



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Departamento de Física

TESIS DOCTORAL

Espectrometría de imagen en el infrarrojo:
una contribución al estudio de las combustiones
y a la teledetección de incendios forestales

Autor:

José Manuel Aranda Gallego

Directores:

Juan Meléndez Sánchez y Fernando López Martínez.

Leganés, 2002

A mis padres y hermanos

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a todas las personas que durante estos años han formado parte del grupo, mas bien de la *familia*, del *Laboratorio de Sensores Teledetección e Imagen IR*, perteneciente al Departamento de Física de esta Universidad Carlos III de Madrid, y que han permitido que este trabajo se haya desarrollado en un inmejorable ambiente, tanto científico como humano.

En especial quiero dar las gracias a **Fernando López** y a **Juan Meléndez** por brindarme la oportunidad de formarme y desarrollar mi trabajo en este campo tan apasionante de la Física Aplicada. Ambos han sabido transmitirme no sólo sus vastos conocimientos, sino también la forma de afrontar y orientar el trabajo para lograr la consecución de los objetivos. Les estoy enormemente agradecido por su preocupación, esfuerzo y dedicación para que este barco llegase a buen puerto salvando los obstáculos de todo tipo encontrados en su travesía.

También agradezco a Antonio de Castro su disposición en todo momento para facilitar mi trabajo, aclarándome conceptos sobre espectrorradiometría y por sus cálculos de transmitancias; a Susana Briz por sus medidas de espectrorradiometría FTIR; a Marta Ugarte por su optimismo y ayuda en temas de electrónica; a Jesús Meneses por la caracterización de filtros interferenciales; a José Manuel Yebras por su ayuda en la ampliación de funciones del sistema de adquisición; y a Laura García por su colaboración en la mejora y realización de programas.

También quiero dar las gracias a los técnicos del departamento, Domingo de la Rosa y David Fernández. Especialmente a este último por su labor en el desarrollo del sistema mecánico para embarcar el espectrómetro en helicóptero.

Mi agradecimiento, al catedrático Pedro Rodríguez, y a los profesores Mercedes de Vega y Ulpiano Ruiz-Rivas del Área de Ingeniería Térmica de la Universidad Carlos

III Madrid, por su colaboración para facilitar mi labor docente durante las campañas de medida.

También mi reconocimiento al CIDA (Ministerio de Defensa) por el importante apoyo que presta a los pocos grupos que en España trabajamos en el campo de la tecnología infrarroja, y en particular a su Directora de Investigación Dra. Maria Teresa Montojo.

Mi agradecimiento al INIA, en particular a Carmen Hernando y Mercedes Guijarro la aportación a este trabajo de sus conocimientos, experiencia e instalaciones en el campo de los incendios forestales de los que nuestro laboratorio carecía.

He de agradecer la colaboración de los Servicios de Lucha contra Incendios de la Junta de Andalucía, en particular a Francisco Rodríguez Silva, por sus facilidades para la realización de quemas controladas. También a Manuel González Gabaldón, Director General de FAASA, por las facilidades ofrecidas para la utilización de sus helicópteros y por la colaboración tanto suya, como de pilotos y mecánicos para solventar las dificultades encontradas.

En el aspecto económico, hay que señalar que este trabajo ha sido financiado en parte por la Comisión Europea a través de los proyectos: “FUEGO 2: *Instrument Design Prototype Construction and Validation*” dentro del *IV Framework Programme* (programa *Environment & Climate*) y “*Fire Star: A Decision Support System for Fuel Management and Fire Hazard Reduction in Mediterranean Wildland – Urban Interfaces*”.

Finalmente, quiero agradecer a mis padres y hermanos el apoyo incondicional y su ayuda en todos los sentidos, sin los cuales realmente no hubiese podido realizar este trabajo, y porque realmente son los que me han animado y soportado en los momentos más difíciles.

Resumen

El principal objetivo de este trabajo ha sido la optimización de la detección mediante imagen infrarroja (IR) de fenómenos con una marcada estructura espectral en su emisión IR. Estos fenómenos, como se describe en los *capítulos 1 y 2*, plantean serios retos a la termografía clásica, aún no resueltos. En ellos están incluidos las llamas, incendios forestales y en general, cualquier proceso con una importante emisión IR debida a gases. La propuesta de optimización está basada en aprovechar estas propiedades espectrales junto con la información espacial. La combinación de la resolución espacial y espectral es la base de la *espectrometría de imagen*. El espectrómetro de imagen más simple es el biespectral, que suministraría imágenes simultáneas, co-registradas y calibradas radiométricamente en dos bandas. Estos requisitos tan exigentes no se encuentran en equipos comerciales actuales. Por lo tanto, un primer objetivo de este trabajo ha sido construir un espectrómetro de imagen biespectral a partir de dos cámaras IR (una en el infrarrojo medio y otra en el térmico). El desarrollo de este sistema se describe en el *capítulo 3*. Un segundo objetivo ha sido la extracción del máximo de información de las imágenes biespectrales adquiridas por nuestro sistema, aplicando técnicas de procesamiento espectral de imagen. Estas técnicas, originalmente desarrolladas para teledetección con imágenes de satélite, se describen en el *capítulo 4*, y serán aplicadas en los siguientes capítulos. En el *capítulo 5* se define el concepto de imágenes índices de fuego y se aplica a llamas y pequeños fuegos. En el *capítulo 6* se estudian estas imágenes, y también de fuegos forestales, usando métodos de clasificación para optimizar la detección. En el *capítulo 7* se extienden los principios de detección utilizados anteriormente a nuevas aplicaciones (generación de mapas de temperatura de llamas, detección de combustiones en situaciones límite e identificación y visualización de gases) mediante un espectrómetro hiperespectral en el infrarrojo medio, que se utiliza para seleccionar las bandas apropiadas (en número, centrado espectral y anchura) a cada aplicación.

Abstract

The main objective of this work has been to optimize the detection by means of infrared (IR) imaging of phenomena that have an IR emission with a marked spectral structure. These phenomena, as described in *Chapters 1* and *2*, raise serious challenges to ordinary thermography not yet solved. They include flames, forest fires, and any process with an important IR emission from gases. The proposed optimization is based upon taking advantage of spectral properties together with spatial information. This combination of spectral and spatial resolution is the basis of imaging spectrometry. The simplest *imaging spectrometers* are *bi-spectrals*, acquiring simultaneously co-registered images in two bands, radiometrically calibrated. This very demanding requirements are not met at present by manufactured equipments. Therefore a first partial objective of this work has been to build a bi-spectral imaging spectrometer by integrating two IR cameras (operating in the medium IR and thermal IR). The implementation of this imaging system is described in *Chapter 3*. The second partial objective has been to extract a maximum of information of the bi-spectral images acquired by our system, by applying spectral image processing techniques. These techniques, originally developed for satellite remote sensing, are described in *Chapter 4*, and are applied in the following chapters. In *Chapter 5*, fire indexes are defined and used to analyze bi-spectral images of flames and small fires. In *Chapter 6* these images, as well as forest fire images, are studied using classification techniques in order to optimize detection. In *Chapter 7*, the principles of bi- or multi-spectral detection are extended to new applications, by using a hyperspectral imaging spectrometer operating in the medium IR band in order to select appropriate bands (number, spectral position and width). It is also studied how to use infrared imaging spectrometry to determine and to map the temperature of flames.

Nomenclatura

Símbolo	Magnitud	Unidades
α	absortancia	adimensional
$\Delta\lambda$	banda espectral	μm
Δf	ancho de banda (en frecuencias)	Hz
ε	emisividad	adimensional
ε_{ef}	emisividad efectiva	adimensional
ε_{rel}	error relativo	adimensional
Φ	flujo radiante o potencia radiante	W
Φ_{D}	potencia radiante sobre el detector (incidente)	W
γ	coeficiente de scattering	km^{-1}
φ	ángulo azimutal	rad
λ	longitud de onda	μm
λ_{C}	longitud de onda de máximo contraste	μm
λ_{max}	longitud de onda del máximo de emisión espectral	μm
θ	ángulo polar	rad
θ_{Airy}	resolución angular asociada al disco de Airy	mrاد
$\theta_{\text{Compuesta}}$	resolución compuesta	mrاد
θ_{IFOV}	resolución angular asociada al IFOV	mrاد
θ_{Nyquist}	resolución angular asociada a la frecuencia de Nyquist	mrاد
Θ	semiángulo total de emisión o detección	rad
ρ	reflectancia	adimensional
ρ_{ef}	reflectancia efectiva	adimensional
σ	constante de Stefan-Boltzmann	$\text{W}/\text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^4$
$\sigma, \sigma_x, \sigma_y$	error (en ordenadas o abscisas)	

Símbolo	Magnitud	Unidades
σ	coeficiente de extinción	km^{-1}
τ	transmitancia	adimensional
τ_f	transmitancia llama	adimensional
ω	ángulo sólido	sr
Ω	ángulo sólido proyectado	sr
a	absortividad	cm^2
$a(\lambda)$	coeficiente de absorción	km^{-1}
a	constante de la Ley de Wien	$\mu\text{m K}$
A_D	área del detector	cm^2
A_{img}	área de la imagen	cm^2
AN	apertura numérica	adimensional
A_S	área de la fuente	cm^2
B	factor espectral	K
c	velocidad de la luz	cm/s
C	concentración	cm^{-3}
$C_{\Delta\lambda}$	contraste térmico para un intervalo espectral $\Delta\lambda$	adimensional
$C_{\Delta\lambda}$	contraste térmico diferencial relativo	adimensional
c_1	primera constante de radiación	$\text{W } \mu\text{m}^4 / \text{cm}^2$
c_2	segunda constante de radiación	$\mu\text{m K}$
CN	cuerpo negro	
CP	componente principal	
d	distancia entre dos puntos	cm
$d\omega$	elemento diferencial de ángulo sólido	sr
D^*	detectividad específica	$\text{cm Hz}^{1/2} / \text{W}$
dA	elemento diferencial de área	cm^2
d_{cc}	distancia entre centro de detectores en un FPA (<i>pixel pitch</i>)	μm
D_{pe}	diámetro de la pupila de entrada	cm
E	irradiancia	W / cm^2
f	distancia focal	mm
F	factor de forma	adimensional
$F(T)$	función de calibrado	W/m^2

Símbolo	Magnitud	Unidades
$F/\#$	número F	adimensional
$F^{-1}(L)$	función inversa de calibrado	K
f_N	frecuencia de Nyquist	
FOV	campo de vision (<i>Field of View</i>)	mrad
f_s	frecuencia de muestreo	
$Gain_{cam}$	ganancia global de la cámara	$(W/m^2 \text{ sr})^{-1}$
$Gain_d$	ganancia de cada detector	$(W/cm^2 \text{ sr})^{-1}$
h	constante de Planck	J s
I	intensidad	W/sr
IFOV	campo de visión instantáneo	mrad
k	constante de Boltzmann	J/K
l	espesor	cm
L	radiancia	$W/cm^2 \text{ sr}$
$L(\lambda)$	radiancia espectral	$W/cm^2 \text{ sr } \mu m$
$L^{CN}(T)$	radiancia emitida por un cuerpo negro a temperatura T	$W/cm^2 \text{ sr}$
$L_n(\lambda)$	radiancia espectral normalizada	$W/cm^2 \text{ sr } \mu m$
m	aumento	adimensional
M	exitancia	W/cm^2
$M^{CN}(T)$	exitancia total emitida por un cuerpo negro a temperatura T	W/cm^2
$M(\lambda)$	exitancia espectral de un cuerpo	W/cm^2
$M^{CN}(\lambda)$	exitancia espectral de un cuerpo negro	W/cm^2
MDTD (MDT)	mínima diferencia de temperatura detectable	mK
MRTD (MRT)	mínima diferencia de temperatura resoluble	°C
MTF	función de transferencia de modulación	adimensional
n	número de detectores en una dimensión del array	adimensional
ND	número digital	adimensional
NEP	potencia equivalente de ruido	W
NETD (NEAT)	diferencia de temperatura equivalente al ruido	mK
$Offset_{cam}$	offset global de la cámara	adimensional
$Offset_d$	offset de cada detector	adimensional
p	distancia objeto	cm
q	distancia imagen	cm

Símbolo	Magnitud	Unidades
Q	energía radiante	J
r	coeficiente de regresión	adimensional
R	factor de respuesta	W/m ² sr
$\Re(\lambda)$	responsividad	V/W
R _D	radio del detector	mm
S	señal de salida de un detector	V
SNR	relación señal-ruido	adimensional
t	dimensión lineal de un detector	μm
T	temperatura absoluta	K
T	temperatura	°C
T ^{ap} _{boj}	temperatura de brillo aparente del objeto	°C / K
T _{boj}	temperatura de brillo del objeto	°C / K
T _{obj}	temperatura del objeto	°C / K
V _{ruido}	voltaje de ruido	V
x	camino recorrido por la radiación	cm
x	abscisas	adimensional
y	ordenadas	adimensional

Acrónimos

AD	Analógico Digital
AGC	Automatic Gain Control
AET	Asociación Española de Teledetección
AIS	Airborne Imaging Spectrometer
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
AVIRIS	Advanced Visible and Infrared Imaging Spectrometer
BIRD	Bispectral InfraRed Detection
BST	Bario-eStroncio-Titanio
CARS	Coherent Anti-Stokes Raman Scattering
CCD	Charge Coupled Device
CCIR	Comite Consultatif International des Radio communications
CIDA	Centro de Investigación y Desarrollo de la Armada
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage
CIFOR	Centro de Investigaciones Forestales
CP	Componente Principal
CPU	Central Process Unit
DIU	Digital Interface Unit
DLR	Deutsches zentrum für Luft-und Raumfahrt
DMA	Direct Memory Access
EMUX	Electronically MultipleXed
ENVI	ENvironment for Visualizing Images
EOMUX	Electro-Optically MultipleXed
EO-1	Earth Observing 1
EOS	Earth Observing System
ERST-1	Earth Resources Technology Satellite 1
ESA	European Space Agency
FI	infrared Fire Index

FITS	Flexible Image Transport System
FLIR	Forward Looking InfraRed
FOS	Fire Observing System
FOV	Field Of View
FPA	Focal Plane Array
fps	frames per second
FTIR	Fourier Transform InfraRed
GCP	Ground Control Point
HC	HidroCarburos
HITRAN	High spectral resolution TRANsmission
HSVB	High Speed Video Bus
IDL	Interactive Data Language
IE	Índice Espectral
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IFOV	Instantaneous Field Of View
IMSS	Image Multi-Spectral Sensor
INIA	Instituto Nacional de Investigación Agraria y alimentaria
IR	InfraRed
ISO	International Standard Office
ISS	International Space Station
IUPAP	International Union of Pure and Applied Physics
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LIF	Laser Induced Fluorescence
LOWTRAN	LOW spectral resolution TRANsmission
LUT	Look-Up-Table
MCT	Mercurio-Cadmio-Teluro (HgCdTe)
MDT	Minimum Detectable Temperature difference
MDTD	Minimum Detectable Temperature Difference
MFI	Medium infrared Fire Index
MiniDV	Digital Video (de reducidas dimensiones)
MIR	Medium InfraRed
MODIS	MODerate Infrared Sounder
MODTRAN	MODerate spectral resolution TRANsmission
MRT	Minimum Resolvable Temperature

MRTD	Minimum Resolvable Temperature Difference
MSS	Multi-spectral Scanner System
MTF	Modulation Transfer Function
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ND	Número Digital
ND1	Neutral Density filter 1
ND2	Neutral Density filter 2
NDT	Non-Destructive Testing
NEI	Noise Equivalent Irradiance
NEP	Noise Equivalent Power
NESR	Noise Equivalent Spectral Radiance
NETD ó NEAT	Noise Equivalent Temperature Difference
NIR	Near InfraRed
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NTSC	National Television System Committee
NUC	Non-Uniformity Correction
PAL	Phase Alternate Line
PCA	Principal Components Analysis
PCI	Peripheral Component Interconnect
PDet	Probabilidad de Detección
PFA	Probabilidad de Falsa Alarma
QWIP	Quantum Well Infrared Photodetector
RAM	Random Access Memory (read/write)
RGB	Red Green Blue
ROC	Receiver Operating Characteristics
ROI	Region Of Interest
RS-170	Estándar de vídeo compuesto norteamericano
RS-232	Estándar de comunicación digital de datos en serie
RS-442	Estándar de comunicación digital de datos en paralelo en modo diferencial
SCART	Syndicat des Constructeurs d'Appareils Radio récepteurs et Téléviseurs
SDK	Software Development Kit
SIR	Short InfraRed

SNR	Signal to Noise Ratio
SPIE	Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers
SPOT	System Probatoire d'Observation de la Terre
SPRITE	Signal Processing In The Element
TDI	Time-Delay-and-Integrate
TED	Tom Ellitot's Device
TFT	Thin Film Transistor
TIA	TransImpedance Amplifier
TIR	Thermal InfraRed
TQ	Tierra Quemada
u.a.	unidades arbitrarias
VGA	Video Graphics Adaptor
XIR	eXtreme InfraRed

Bibliografía

- [Agema 92] *“Thermovision 480 Series. Operating Manual”*. AGEMA Infrared Systems AB. Publ. n. 556991. Danderyd, Sweden, 1992.
- [Aranda 99] Aranda, J.M.; de Castro, A.J.; Briz, S.; Meléndez, J. y López, F. *“Teledetección precoz de incendios forestales mediante sensores IR: Discriminación espectral de falsas alarmas”*, Teledetección. Avances y Aplicaciones. S. Castaño y A. Quintanilla eds. 271-274, AET, Albacete, 1999.
- [Aranda 00] Aranda, J.M.; Briz, S.; Meléndez, J.; de Castro, A.J and López, F. *“Flame analysis by IR thermography and IR hyperspectral imaging”*. Proceedings of Quantitative Infrared Thermography V - QIRT 2000, **pp** 337-342, 2000.
- [Aranda 01a] Aranda, J.M.; Briz, S.; de Castro, A.J; Meléndez, J. and López, F. *“Spectral infrared characterization of forest fire scenarios”*. Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems and Hydrology II M. Owe, G. D’Urso and E. Zilioli eds. SPIE Proc. **vol** 4171, **pp** 177-184, 2001.
- [Aranda 01b] Aranda, J.M.; Meléndez, J.; de Castro, A.J. and López, F. *“Forest fire studies by medium infrared and thermal infrared thermography”*. Proceedings of Thermosense XXIII, Rozlosnik, A.E. and Dinwiddie, R.B eds, SPIE Proc. **vol.** 4360, **pp.** 161 – 168, Orlando, 2001.
- [Aranda 01c] Aranda, J.M.; Meléndez, J.; de Castro, A.J.; Briz, S.; Ugarte, M.F. y López, F. *“Procesado biespectral de imágenes infrarrojas de incendios forestales correlacionadas espacio-temporalmente”*. Teledetección. Medio Ambiente y Cambio Global, Joan I. Rosell y José A. Martínez-Casanova eds. 243-247, AET, Lérida 2001.

- [Barlow 89] Barlow, Roger. *"Statistics: A Guide to the Use of Statistical Methods in the Physical Sciences"*. John Wiley & Sons, Chichester, 1989.
- [Blackbody 85] *"Instruction Manual Blackbody Radiation Source Model W5153 and Temperature Controller Model 215B"*. Electro Optical Industries Inc. Santa Barbara, California (USA) April 1985.
- [Breckinridge 96] Breckinridge, J.B. *"Evolution of Imaging Spectrometry: Past, Present, and Future"*. Proceedings of Imaging Spectrometry II, Descour, Michael R. and Mooney, Jonathabn M. eds., Proc. SPIE **vol.** 2819, **pp.** 2-6, 1996.
- [Britannica 94] Encyclopaedia Britannica, 1994.
- [Briz 01] Briz Pacheco, Susana. *"Teledetección Infrarroja de Gases Atmosféricos Mediante Espectrorradiometría FTIR"*. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, octubre 2001.
- [Burnay 88] Burnay, S.G.; Williams, T.L. and Jones, C.H. *"Applications of Thermal Imaging"*. 1st ed., Adam Hilger, Bristol (England) 1988.
- [Campbell 96] Campbell, James B. *"Introduction to Remote Sensing"*. 1st ed., The Guilford Press, New York (USA) 1996.
- [Casanova 00] Casanova, J.L. *"Aplicación de la Teledetección para Evaluación de los Factores Ambientales"* en *La Defensa contra Incendios Forestales*, Vélez, Ricardo coordinador, McGraw-Hill, Madrid, 2000.
- [Chuvieco 96] Chuvieco, Emilio. *"Fundamentos de Teledetección Espacial"*. Ediciones RIALP, 3^a ed., Madrid (España) 1996.
- [Chuvieco 94] Chuvieco, E. and Martín, M.P. *"Global Fire Mapping and Fire Danger Estimation Using AVHRR Images"*. Photogrammetric Eng. & Remote Sensing, **vol.** 60, (5), **pp.** 563-570, 1994.
- [Clark 84] Clark, R.N. and Roush, T.L. *"Reflectance Spectroscopy: Quantitative Analysis Techniques for Remote Sensing Applications"*. Journal of Geophysical Research, **vol.** 89, **pp.** 6329 – 6340, 1984.
- [Colimador 87] *"Instruction Manual Off-Axis Reflecting Parabolic Mirror System Model 66365"*. Electro Optical Industries Inc. Santa Barbara, California (USA) April 1987.

- [Dauguet 64] Dauguet, A. “*La Detection des Radiations Infrarouges et ses Applications*”. Dunod, Paris (France) 1964.
- [de Castro 00] de Castro, A.J.; Aranda, J.M.; Briz, S. and López, F. “*Ground-based Infrared Characterization of Fires in the 3 – 5 μm window*”. Proc. of the 19th EARSeL Symposium on Remote Sensing in the 21th Century: Economic and Environmental Applications. J.L Casanova Editor, **pp.** 337 – 341, Róterdam (Holanda), 2000.
- [de Castro 98] de Castro, A.J.; Aranda, J.M.; Briz, S.; López, F.; Hernando, C.; Guijarro, M. and Díaz, C. “*Ground-based Infrared Remote Sensing of Forest Fires*”. Europto Series. Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems and Hydrology. Barcelona Proc. SPIE **vol.** 3499, **pp.** 416 – 426, 1998.
- [den Breejen 98] den Breejen, E.; Roos, M.; Schulte, S.; de Vries, J.S. and Winkel, H. “*Infrared Measurements of Energy Release and Flame Temperatures of Forest Fires*”. III International Conference on Forest Fire Research, **vol.** I, **pp.** 517-532, Luso, Portugal, November 1998.
- [Dereniak 96] Dereniak, E.L. and Boreman, G.D. “*Infrared Detector and Systems*”. 1st ed., John Wiley and Sons, New York (USA) 1996.
- [Desk Station 96] “*Desk Station V Plus User’s Manual*”, Toshiba Corporation 1st ed., Toshiba Europe GmbH, Regensburg Germany, May 1996.
- [Dozier 81] Dozier, Jeff . “A Method for Satellite Identification of Surface Temperature Fields of Subpixel Resolution”. Remote Sensing of Environment **vol.** 11, **pp.** 221-229, 1981.
- [DT3152 98] “*Mach Series*” and “*DT 3152 User Manual*”. Data Translation Inc. 1st ed., September 1998.
- [Eckberth 88] Eckbreth, A.C. “*Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species*”, Abacus Press, Tunbridge Wells, Kent, U.K., 1988.
- [ENVI 00] “*ENVI User Manual version 3.4*”. Research Systems Inc. ed., Boulder, Colorado (USA) September 2000.
- [Fanning 98] Fanning, David W. “*IDL Programming Techniques*”, 3rd ed. Fanning Software Consulting, Fort Collins, Colorado (USA) 1998.

- [Fernández 97] Fernández, A.; Illera, P. and Casanova, J.L. (1997). “*Automatic Mapping of Surfaces Affected by Forest Fires in Spain Using AVHRR NDVI Composite Image Data*”. Remote Sensing of Environment, **vol.** 60, **pp.** 153-162, 1997.
- [Findlay 89] Findlay, Geoffrey A. and Cutten, Dean R. “*Comparison of performance of 3 – 5 and 8 –12 μm infrared systems*”. Applied Optics **vol.** 28, **No.** 23, **pp.** 5029 – 5037, December 1989.
- [Flannigan 86] Flannigan, M.D. and Vonder Haar, T. H. “*Forest Fire Monitoring Using NOAA satellite AVHRR*”, Canadian Journal Forest Research **vol.** 16 **pp.** 975 – 982, 1986.
- [Fraedrich 91] Fraedrich, Douglas S., “*Methods in Calibration and Error Analysis for Infrared Imaging Radiometers*”. Optical Engineering, **vol.** 30, **Nº** 11, **pp.** 1764-1770, November 1991.
- [Gaussorgues 89] Gaussorgues, Gilbert. “*La Thermographie Infrarouge. Principes Technologies Applications*”. Techniques et Documentation Lavoisier, 3^e éd., Paris (France) 1989.
- [Hamrelius 91] Hamrelius, Torbjörn. “*Accurate temperature measurement in thermography. An overview of relevant features, parameters and definitions*”. Proc. SPIE **vol.** 1467 Thermosense XIII **pp.** 448 – 457, 1991
- [Hecht 77] Hecht, E. y Zajac, A. “*Óptica*”. Fondo Educativo Interamericano, 1977.
- [Hernando 00] Hernando, Carmen. “*Combustibles Forestales: Inflamabilidad*” en *La Defensa contra Incendios Forestales*, Vélez, Ricardo coordinador, McGraw-Hill, Madrid, 2000.
- [Hinnrichs 00] Hinnrichs, Michele “*Hyperspectral imaging for target enhanced contrast. Final Report*”. Prepared by Pacific Advanced Technology. March 2000. [website 9].
- [Hinnrichs 97] Hinnrichs, Michele and Massie, Mark A. “*New Approach to Imaging Spectroscopy Using Diffractive Optics*”. Proceedings of Imaging Spectrometry III, Descour, Michael R. and Shen, Sylvia S. eds., Proc. SPIE **vol.** 3118, **pp.** 194-205, 1997.

- [Holst 00] Holst, Gerald C. “*Common Sense Approach to Thermal Imaging*”. JCD Publishing and SPIE Optical Engineering Press, 1st ed., Florida and Washington (USA) 2000.
- [Holst 95] Holst, Gerald C. “*Electro-Optical Imaging System Performance*”. 1st ed., JCD Publishing and SPIE Optical Engineering Press, Florida and Washington (USA) 1995.
- [Holst 98] Holst, Gerald C. “*Testing and evaluation of infrared imaging systems*” 2nd ed., Winter Park. JCD Publishing and SPIE-The International Society for Optical Engineering, Bellingham, Washington, (USA) 1998.
- [Hudson 69] Hudson, Richard D. Jr. “*Infrared System Engineering*”. 1st ed., John Wiley and Sons, New York (USA) 1969.
- [HyPAT II 01] “*HyPAT II. User’s Manual*” Pacific Advanced Technology Inc. ed. versión 4.03, 2001.
- [IDL 99] “*Using IDL*”. IDL version 5.3. Research Systems Inc. ed., Boulder, Colorado (USA) September 1999.
- [IM-PCI 95] “*IM-PCI Hardware Reference Manual*” Imaging Technology Incorporated. 1995.
- [IMSS 97] “*Image Multi-Spectral Sensor. User’s Manual. European Version*” Pacific Advanced Technology Inc. ed., versión 1.0, September 1997.
- [Kaplan 99] Kaplan, Herbert. “*Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment*”. 2nd ed., SPIE Optical Engineering Press, Washington (USA) 1999.
- [Kruse 95] Kruse, F.A.; Lefkoff, A.B. and Dietz, J.B. “*Expert System-Based Mineral Mapping in Northern Death Valley, California/Nevada Using the Airborne Visible-Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS)*”. Remote Sensing of Environment, **vol. 44**, **pp.** 309 – 336, 1995.
- [Kruse P.W. 97] Kruse, P.W. “*Principles of Uncooled Infrared Focal Plane Arrays*” in *Uncooled Infrared Imaging Arrays and Systems*, Kruse, Paul W. and Skatrud, David D. eds., of Semiconductors and Semimetals Volume 47, Willardson, R.K. and Weber, E.R. eds., Academic Press, San Diego, California, (USA) 1997.

- [Lewis 87] Lewis, B. and Von Elbe, G. “*Combustion, flames and explosions of gases*”, 3th ed., Academic Press, Orlando, 1987.
- [Lillesand 94] Lillesand, Thomas M. and Kiefer, Ralph W. “*Remote Sensing and Image Interpretation*”. 3rd ed., John Wiley and Sons, New York (USA) 1994.
- [Lloyd 82] Lloyd, J.M. “*Thermal Imaging Systems*”. Plenum Press, 3th ed. New York (USA) 1982.
- [López 92] López, F.; de Frutos, J.; González, A.M. and Navarro, A. “*Integrated Optical Filters for Infrared Electro-Optical Gas Sensor*”. Sensors and Actuators B, **vol. 6**, **pp.** 170 – 175, 1992.
- [López 94] López, F.; de Castro, A.J.; Meléndez, J. and Meneses, J. “*Design of a New Sensor of Multiple Gases Based on the Integration of Interferences Filters*”. Proc. SPIE **vol.** 2253, **pp.** 872 –, 1994
- [López S. 91] López, S.; González-Alonso, F.; Llop, R. and Cuevas, J.M. “*An Evaluation of the Utility of NOAA-AVHRR Images for Monitoring Forest Fire Risk in Spain*”. International Journal of Remote Sensing, **vol.** 12, **pp.** 1841-1851, 1991.
- [Maldague 94] Maldague, Xavier P.V. “*Infrared Methodology and Technology*” of “*Nondestructive Testing Monographs and Tracts*” Volume 7 Editor-in-Chief McGonagale, Warren J. Gordon and Breach Science Publishers, Switzerland 1994.
- [Marshall 96] Marshall, Charles; Butler, Neal; Blackwell, Richard; Murphy, Robert and Breen Tom. “*Uncooled Infrared Sensor With Digital Focal Plane Array*”. Proc. SPIE **vol.** 2746, **pp.** 23 – 31, 1996.
- [Mather 01] Mather, Paul M. “*Computer Processing of Remotely-Sensed Images. An Introduction*”. John Wiley and Sons, 2nd ed. Chichester (England) 1989.
- [Martínez 00] Martínez, E. “*Sistemas. Equipos. Organización*” en *La Defensa contra Incendios Forestales*, Vélez, Ricardo coordinador, McGraw-Hill, Madrid, 2000.
- [Meléndez 95] Meléndez, J.; de Castro, A.J.; López, F. and Meneses, J. “*Spectrally Selective Gas Cell for Electro-Optical Infrared Compact Gas Sensor*”. Sensors and Actuators A, **vol.** 46 – 47, **pp.** 417 – 421, 1995.

- [Meneses 99] Meneses Alonso, Jesús. “*Optimización de los Procesos de Selección Espectral en el Infrarrojo y su Aplicación a los Sensores de Gases*”. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, septiembre 1999.
- [Meyer 96] Meyer, Bill; Cannata, Robert; Stout, Arthur; Gin, Andy; Taylor, Peter; Woodbury, Eric; Deffner, John and Ennerson, Fred. “*Amber’s Uncooled Microbolometer LWIR Camera*”. Proc. SPIE **vol.** 2746, **pp.** 13 – 22, 1996.
- [Nicodemus 63] Nicodemus, Fred E. “*Radiance*”. American Journal Physics 31, 5, **p** 368 – 377 (1963).
- [Ontar 96] Ontar Corporation. “*PcModWin3 Manual*”, Ontar Corporation, North Andover, Massachusetts, January, 1996.
- [Papini 94] Papini, Françoise et Gallet, Paulin. “*Thermographie Infrarouge. Image et mesure*”. Masson, Paris (France) 1994.
- [Pinilla 95] Pinilla Ruiz, Carlos “*Elementos de Teledetección*”. Ra-Ma, Madrid, 1995.
- [Press 89] Press, William H. et al. “*Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*”. Cambridge University Press , Cambridge, 1989.
- [Provost 97] Provost, Foster; Fawcett, Tom. “*Analysis and Visualization of Classifier Performance: Comparison under Imprecise Class and Cost Distributions*”. Proceedings of the Third International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Huntington Beach, California, 1997.
- [Radford 96a] Radford, W.; Murphy, D.; Ray, M.; Prospt, S.; Kennedy, A and Soch, K. “*320 x 240 Microbolometer Focal Plane Array for Uncooled Applications*”. Proc. SPIE **vol.** 2685, **pp.** 80 – 90, 1996.
- [Radford 96b] Radford, W.; Murphy, D.; Ray, M.; Prospt, S.; Kennedy, A.; Kojiro, J.; Woolaway, J. and Soch, K. “*320 x 240 Silicon Microbolometer Uncooled IRFPAs with on-chip Offset Correction*”. Proc. SPIE **vol.** 2746, **pp.** 82 – 92, 1996.
- [Radiance 1 93] “*Radiance 1 Camera Manual, Release 1.0a*”. Amber Engineering Inc. A Raytheon Company ed., August 1993.
- [Radiance PM] “*Radiance PM Operating Manual*” Amber Engineering Inc. A Raytheon Company ed.,

- [Richards 99] Richards, J.A.; Jia, Xiuping. *“Remote Sensing Digital Image Analysis”*. 3rd ed. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1999.
- [Riedl 95] Riedl, Max J. *“Optical Design Fundamentals for Infrared Systems”*. SPIE Optical Engineering Press, 1st ed, Bellingham, Washington (USA) 1995.
- [Road Runner 96] *“Road Runner Technical Documentation”* and *“Road Runner Software Reference”*. BitFlow Inc. 1996.
- [Robinson 91] Robinson, J.M. *“Fire from space: Global fore evaluation using infrared remote sensing”*, Int. J. Remote Sensing, **vol.** 12, no.1, **pp.** 3-24, 1991.
- [Roderick 95] Roderick K., Stanley, technical editor, Moore, Patrick O., McIntire, Paul, editors. *“Nondestructive Testing Handbook”*, Volume 9 Special Nondestructive Methods, 2nd edition, American Society for Nondestructive Testing, USA 1995.
- [Ryu 90] Ryu, Zee M. and Pearce, John A. *“Thermographic calibration of graybody objects”*. Proc. SPIE **vol.** 1313 Thermosense XII, **pp.** 282 – 289, 1990.
- [Sabins 96] Sabins, Floyd F., *“Remote Sensing: Principles and Interpretation”*. W. H. Freeman, 3rd ed., New York (USA) 1996.
- [Schimert 00] Schimert, T.; Brady, J.; Ropson,S.; Gooch, R.; Ritchey, B.; McCardel, P.; Syllaois, A.J.; Tregilgas, J.; Rachels, K.; Weinstein, M. and Wynn, J. *“Low Power Uncooled 120x160 a-Si-based Micro Infrared Camera for Unattended Ground Sensor Applications”*. Proc. SPIE **vol.** 4040 **pp.** 23 – 30, 2000.
- [Schott 97] Schott, John R. *“Remote Sensing The Imaging Chain Approach”*. Oxford Univeersity Press, 1st ed, New York (USA) 1997.
- [Schowengerdt 83] Schowengerdt, Robert A. *“Techniques for Images Processing and Clasification in Remote Sensing”*. Academic Press, Orlando (USA) 1983.
- [Schowengerdt 97] Schowengerdt, Robert A. *“Reomote Sensing. Models and Method for Images Processing”*. Academic Press, San Diego (USA) 1997.

- [Sentinel 96] “*Sentinel. Personal Night Vision System. Operators’ Manual*”. Amber Engineering, Inc, A Raytheon Company ed., September 1996.
- [Simonett 83] Simonett, David S., “*The development and principles of remote sensing*” in *Manual of Remote Sensing*, Colwell, Robert N. ed., *American Society of Photogrammetry* 2nd ed., Falls Church, VA, 1983.
- [Slater 80] Slater, Philip N. “*Remote Sensing. Optics and Optical Systems*”. Addison Wesley Publishing Company, 1980.
- [Smith 93] Smith, F.G. ed. “*Atmospheric Propagation of Radiation*” Volume 2 of *The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook*, Acetta, J.S. and Shumaker, D.L. eds, copublished by Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan and SPIE Press, Bellingham, Washington, (USA) 1993.
- [Solomon 91] Solomon, P.R. and Best, P.E. “*Fourier Transform Infrared Emission /Transmission Spectroscopy in Flames*”, in *Combustion Measurements*, N.A. Chigier, ed., Hemisphere Publishing Corporation (1991).
- [SONY 00] “*Digital Video Camera Recorder DCR TRV20E. Operating Instructions*”. SONY Corporation 2000, Japan.
- [Sterans 86] Stearns, J.R.; Zahniser, M.S.; Kolb, C.E, and Sandford, B.P. “*Airborne Infrared Observations and analyses of a large forest fire*”. *Applied Optics* **vol.** 25, **pp.** 2554 – 2562, 1986.
- [Tecra 510 96] “*Manual del Usuario de Tecra serie 510*”, Toshiba Corporation 1^a edición, Toshiba Europe GmbH, Regensburg Germany, noviembre 1996.
- [Thomas 93] Thomas, P.J.; Hollinger, A.B. and Wiens, R.H. “*Adaptive Infrared Forest Fire Sensor*”. *Proc. SPIE* **vol.** 1969, **pp.** 370 – 381, 1993.
- [Thomas 96] Thomas, P.J.; Gilad, R. and Hug, E. “*Co-registration of Multispectral Imagery for Spaceborne Detection of Forest Fires*”. *Proc. SPIE* **vol.** 2744, **pp.** 644 – 652, 1996.
- [Thomas M.E. 93] Thomas, M.E. and Duncan, L.D. “*Atmospheric Transmission*” in *Atmospheric Propagation of Radiation*, Smith, F.G. ed., Volume

- 2 of *The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook*, Acetta, J.S. and Shumaker, D.L. eds., copublished by Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan and SPIE Press, Bellingham, Washington, (USA) 1993.
- [Ugarte 00] Ugarte, M.F.; de Castro A.J.; Briz, S.; Aranda, J.M. and López, F. “*Automatic and Autonomus Infrared System for Remote Sensing of Forest Fires*”. *Review of Scientific Instruments*, **vol. 71**, **pp.** 3657 – 3661, 2000.
- [Ugarte 01] Ugarte Suárez, Marta F. “*El Método de las Diferencias Correlacionadas. Una Propuesta para la Optimización de los Procesos de Detección Infrarroja: Aplicación a los Incendios Forestales*”. Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, mayo 2001.
- [Vélez 00a] Vélez, Ricardo. “*Los Incendios Forestales en la Cuenca Mediterránea*” en *La Defensa contra Incendios Forestales*, Vélez, Ricardo coordinador, McGraw-Hill, Madrid, 2000.
- [Vélez 00b] Vélez, Ricardo. “*Combustibles Forestales: Combustibilidad*” en *La Defensa contra Incendios Forestales*, Vélez, Ricardo coordinador, McGraw-Hill, Madrid, 2000.
- [Verstraete 96] Verstraete, Michael M. and Pinty, Bernard “*Designing Optimal Spectral Indexes for Remote Sensing Applications*”. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* , **34**, pp1254-1265 (1996).
- [Video Savant 99] “*Video Savant User’s Manual (Preliminary)*”. IO Industries Inc. 1999.
- [Vincent 90] Vincent, John David. “*Fundamentals of Infrared Detector Operation and Testing*”. John Wiley and Sons, New York (USA) 1990.
- [website 1] <http://www.insa.es/fuego/fuego.htm>
- [website 2] <http://spacesensors.dlr.de/SE/bird/>
- [website 3] http://www.ohb-system.de/eo/focus/0_focus.htm
- [website 4] <http://www.raytheoninfrared.com/html/prodmenu.htm>
- [website 5] <http://www.indigosystems.com>
- [website 6] <http://makalu.jpl.nasa.gov/aviris.html>

- [website 7] <http://eo1.gsfc.nasa.gov/Spacecraft/eo1Spacecraft.html>
- [website 8] <http://eo1.gsfc.nasa.gov/Technology/Hyperion.html>
- [website 9] <http://www.patinc.com>
- [website 10] <http://www.amber-infrared.com/products/radiance1t.html>¹
- [website 11] <http://www.bitflow.com>
- [website 12] <http://www.ioindustries.com>
- [website 13] <http://fits.gsfc.nasa.gov>
- [website 14] <http://www.manfrotto.com>
- [website 15] <http://www.liesegang.de>
- [website 16] <http://www.helicopter.virtualave.net/205.html>
- [website 17] <http://www.helicopter.virtualave.net/206.html>
- [website 18] <http://www.hutchinson.fr/paulstra.vibrachoc>
- [website 19] <http://www.rsinc.com>
- [website 20] <http://www.atsr.rl.ac.uk/atsr/index.shtml>
<http://odisseo.esrin.esa.it/ionia/FIRE/AF/ATSR/>
- [Wilmot 93] Wilmot, Donald; Owens, William and Shelton, Robert. “*Warning Systems*”, in “The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook”, Accetta, Joseph S.; Shumaker, David L., ed., of volume 7: “*Countermeasure Systems*”; Pollock, David H., ed., Infrared Information Analysis Center ; Bellingham, SPIE Optical Engineering Press, Ann Arbor, USA, 1993.
- [WiT 97] “*Operator Reference Manual*” and “*Users Manual*” Logical Vision Ltd. 1997
- [Wolfe 96] Wolfe, William L. “*Introduction to Infrared System Design*”. SPIE Optical Engineering Press, 1st ed, Bellingham, Washington (USA) 1996.
- [Wolfe 97] Wolfe, William L. “*Introduction to Imaging Spectrometers*”. SPIE Optical Engineering Press, 1st ed, Bellingham, Washington (USA) 1997.
- [Wolfe 99] Wolfe, William L. “*Infrared Design Examples*”. SPIE Optical Engineering Press, 2nd ed, Bellingham, Washington (USA) 1999.

¹ En 1999 esta empresa fue absorbida por Raytheon, por lo que ya no existe dicho *website* donde se encontraban las especificaciones de la cámara Amber Radiance 1t. Ahora se comercializa un modelo parecido Radiance HS [website 4].

- [Wood 97] Wood, R.A. “*Monolithic Silicon Microbolometer Arrays*” in *Uncooled Infrared Imaging Arrays and Systems*, Kruse, Paul W. and Skatrud, David D. eds., of *Semiconductors and Semimetals* Volume 47, Willardson, R.K. and Weber, E.R. eds., Academic Press, San Diego, California, (USA) 1997.
- [Wyatt 91] Wyatt, Clair L. “*Electro-Optical System Design. For Information Processing*”. Mc Graw Hill, New York (USA) 1991.
- [Young 94] Young, R. “*Utilization and Application of Infrared Techniques in Forest Fire Detection and Suppression Operations*”. *Infrared Methodology and Technology. Non Destructive Testing Monograph and Tracts* **vol.** 7, X.P.V Maldague ed., Gordon and Breach Science Publishers, **pp.** 453 – 468, 1994.

Capítulo 1

Introducción

Cuando Daguerre realizó sus primeras fotografías, en 1837 [Británica 94], habían pasado más de 30 años desde el descubrimiento de la radiación infrarroja (IR) por sir William Herschel. No es de extrañar que pronto se intentara captar esa “radiación invisible” en fotografías. John Herschel, su hijo, lo consiguió en 1840, usando un proceso basado en la evaporación diferencial de una delgada capa de aceite¹, obteniendo el primer *termograma*.

Para que la imagen infrarroja pudiera mostrar toda su potencialidad hubo que esperar a dos descubrimientos: los *primeros detectores fotoconductivos* que permitieron captar la energía IR de un modo rápido y preciso, proporcionando una señal eléctrica fácilmente tratable, y el desarrollo de la *tecnología electrónica* que permitió convertir esa señal en una imagen.

De este modo, a finales de los años 40, comenzó a dar sus primeros pasos la *termografía infrarroja*: una técnica de teledetección que hace visibles al ojo humano los contrastes térmicos que se producen en una escena, ampliando así nuestro rango de percepción a zonas del espectro electromagnético que antes eran inaccesibles.

La termografía infrarroja hoy

En la actualidad, hay en el mercado gran variedad de cámaras infrarrojas. Todas integran la radiación incidente en una cierta banda espectral; las más habituales son dos bandas que coinciden con ventanas de transmisión atmosférica (ver apartado 2.3.2): el infrarrojo medio (MIR, de 3 a 5 μm) y térmico (TIR, de 8 a 12 μm)².

¹ Este método conocido hoy como *evaporografía*, no fue rescatado hasta 1929 por Czerny quien mejoró la técnica y sentó sus bases actuales [Hudson 69][Holst 00].

² El nombre de infrarrojo térmico proviene de que a temperatura ambiente la longitud de onda del máximo de radiación está en torno a 10 μm .

La termografía infrarroja es hoy en día una tecnología bien establecida con multitud de aplicaciones [Hudson 69] [Kaplan 00] [Gaussorgues 89] [Burnay 88]:

- Militares: visión nocturna, detección y seguimiento de blancos, vigilancia y control aeroportuario y de fronteras en condiciones de baja visibilidad, etc.
- Medioambientales: detección de incendios forestales, estudio y evaluación de la vegetación, detección de vertidos industriales, fugas de gases tóxicos, etc.
- Industriales: inspección de líneas y estaciones eléctricas, mantenimiento en plantas industriales, control de aislamientos térmicos, control en línea de procesos y todo el floreciente campo de la *evaluación no destructiva* (*NonDestructive Testing*, NDT) [Maldague 94][Roderick 95]: evaluación de componentes en el sector de automoción, control de calidad en el sector de la electrónica, etc.
- Médicas: instrumentación de apoyo para el diagnóstico de cáncer, medida de la temperatura de la piel, estudio de zonas inflamadas, de lesiones en articulaciones y huesos, circulación de la sangre, etc.

Para muchas de estas aplicaciones es suficiente la *termografía cualitativa*, que únicamente muestra la radiación detectada como una imagen en la que aparecen los contrastes térmicos. Los sistemas IR que ofrecen este tipo de información se denominan *sistemas de termovisión* o sistemas de imagen IR. La *termografía cuantitativa*, por el contrario, cuantifica la radiación que incide sobre el sistema de imagen IR y, mediante un calibrado que tiene en cuenta las leyes de la radiación, la respuesta del equipo y las condiciones de medida, muestra una imagen con la distribución de radiancias o “temperaturas”³ de la escena. Las cámaras IR capaces de realizar este tipo de termografía se denominan *radiométricas*.

La termografía infrarroja presenta unas importantes ventajas frente a otros sistemas de *medida de temperaturas*, como termopares, termómetros, termistores, etc. Podemos señalar tres ventajas principales:

- Proporciona una medida a distancia: no hay que entrar en contacto con el sistema para medir su temperatura. Esto implica, a su vez, que no perturba al objeto de la medida, y es apta para medidas en entornos hostiles y para objetos frágiles, pequeños e incluso en movimiento.

³ En los capítulos siguientes se explicará la nomenclatura utilizada para las temperaturas obtenidas: *temperatura aparente*, *temperatura de brillo* y *temperatura real*.

- La medida es simultánea en todos los puntos de la escena, en lugar de secuencial. Esto confiere mayor rapidez, eficiencia y versatilidad.
- Tiempo de respuesta rápido: a diferencia de otros métodos, no hay que esperar un tiempo para la estabilización térmica del sensor.

Además, desde el punto de vista cuantitativo, las medidas termográficas son válidas en un amplio rango de valores, y no están sujetas a algunos errores habituales en los métodos de contacto (cuyos valores están influidos por la temperatura de los alrededores).

Dificultades de la termografía IR en el estudio de llamas e incendios

Uno de los propósitos de nuestros trabajos iniciales con cámaras IR era la detección y caracterización de incendios forestales con cámaras IR, y, como paso previo, el estudio de llamas. Se trata de fenómenos de alta temperatura, que producen una emisión elevada de energía en el infrarrojo, por lo que esta técnica resulta, en principio, muy atractiva para su estudio. Sin embargo, la aplicación de la termografía a estos procesos no es inmediata. Una llama dista mucho de comportarse como un cuerpo negro o gris en el infrarrojo, siendo su emisión muy selectiva en cuanto a la longitud de onda a la que se produce. Este hecho va provocar importantes dificultades a la termografía cuantitativa.

En la figura 1.1 se muestra el *espectro de emisión de una llama en el IR*, tomado experimentalmente mediante espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Se puede apreciar que la emisión principal de la llama se debe a los productos de combustión como el CO₂ y el H₂O, principalmente a la banda del CO₂ en el infrarrojo medio.

Debido a la fuerte dependencia espectral de la emisión de una llama, cuando se intenta hacer termografía cuantitativa se encuentran grandes diferencias de temperatura entre los resultados obtenidos para las diferentes bandas en las que habitualmente se trabaja como son el infrarrojo térmico y el medio. En la figura 1.2 se muestra el perfil vertical de temperaturas que presenta una llama de propano de laboratorio obtenido a partir de las imágenes en la banda TIR (8 – 12 μm) y en la banda MIR (3 – 5 μm)⁴.

⁴ Las temperaturas correspondientes al fondo de la imagen no son válidas debido a que ambas cámaras se han acondicionado para trabajar en un rango de medida de alta temperatura.

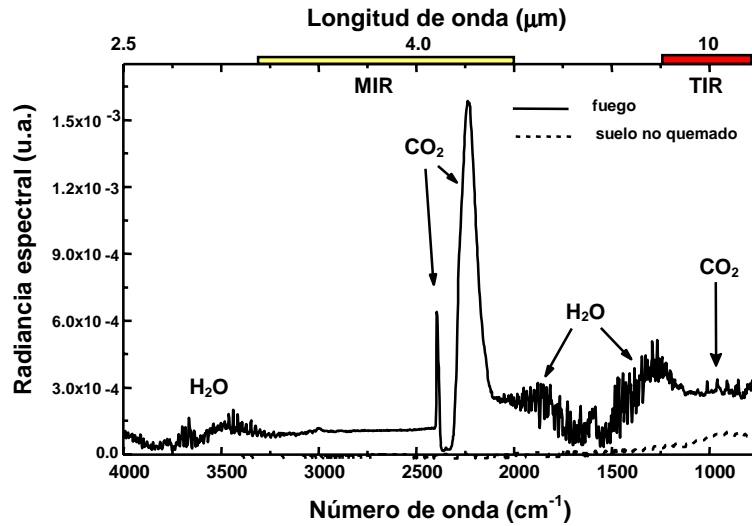


Figura 1.1. – Espectro de emisión de una quema de paja (línea continua) frente a la emisión de la misma antes de la quema (línea discontinua) (adaptada de [Briz 01]).

La razón de estas discrepancias se debe a que la potencia emitida por la llama es integrada por la cámara en una banda espectral muy ancha, cuando la emisión real se produce en una banda relativamente estrecha (figura 1.1). Si no se tiene en cuenta este hecho para el cálculo de la temperatura y se considera la emisión como si fuese un cuerpo negro o gris, la temperatura que proporciona la cámara (“temperatura de brillo”, figura 1.2) es mucho más baja que la real y además diferente en cada banda.

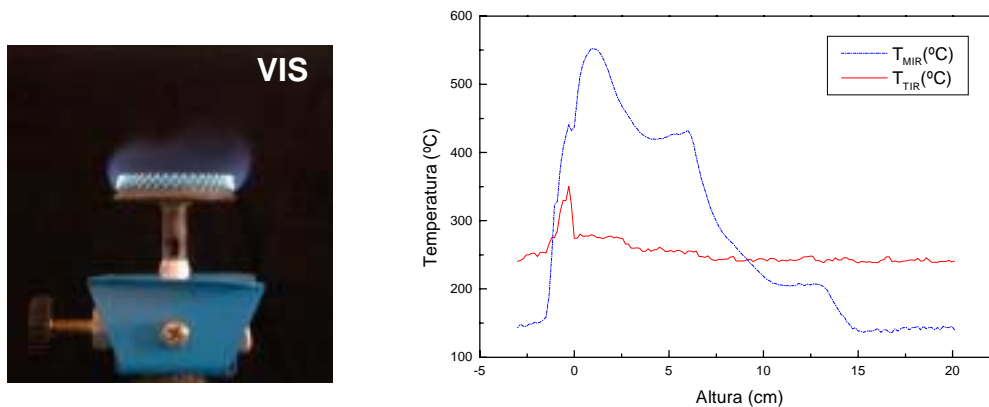


Figura 1.2. – Perfiles de temperaturas de brillo (derecha) de una llama de propano de laboratorio (en visible a la izquierda) obtenido mediante termografía cuantitativa en la banda TIR y MIR. El origen de alturas se ha situado en el borde superior del quemador.

La medida de temperatura de llamas, como se puede apreciar, no es un problema trivial y se abordará en el **Capítulo 7** de esta memoria.

En el caso de la *detección precoz de incendios forestales* la tarea puede parecer más sencilla, ya que no es necesario conocer con exactitud la temperatura de las llamas, sino sólo detectar la “presencia” del incendio. Sin embargo, aunque la gran sensibilidad de las cámaras IR les permite detectar con facilidad incendios a grandes distancias, el diseño de un buen sistema que optimice la detección de pequeños fuegos a grandes distancias y en ambientes de alto “ruido” plantea un problema de enormes dificultades.

En efecto, un sistema de detección ideal es el que posee una elevada probabilidad de detección, unida a una baja tasa de falsas alarmas. Estos requisitos son siempre contradictorios: si para aumentar la probabilidad de detección hacemos el sistema más sensible, inevitablemente aumentarán las falsas alarmas. Este dilema clásico, que impide construir un sistema de alarma perfecto, es especialmente grave cuando se trata de detectar un evento poco probable. En este caso, las falsas alarmas pueden superar fácilmente a las alarmas verdaderas, siendo necesario reducir la sensibilidad del sistema.

Este es precisamente el caso de los incendios forestales: son acontecimientos relativamente infrecuentes en el campo de observación de una cámara, incluso en las épocas de alto riesgo, como el periodo estival [Vélez 00a][Ugarte 01]. La alta sensibilidad de las cámaras infrarrojas las hace susceptibles a las falsas alarmas causadas por reflejos solares y cuerpos calientes. Desgraciadamente, renunciar a esta sensibilidad no es aceptable aquí, pues, para que sea eficaz, la detección de incendios forestales debe ser *precoz*: no se puede esperar a que la emisión del incendio sea muy intensa.

Uno de los objetivos de este trabajo ha sido superar estas dificultades, que resultan insolubles para la termografía convencional (**Capítulos 5 y 6**)

Superando la termografía convencional

Para ilustrar mejor las dificultades de la termografía convencional, y a la vez sugerir cómo superarlas, conviene estudiar un caso concreto con más detalle. En la figura 1.3 se muestra una imagen en el infrarrojo medio de una quema de laboratorio. El combustible es acícula de pino y el frente de llama avanza, alejándose de la cámara, hacia la parte posterior de la imagen, quedando las llamas en la parte superior y el rescoldo y tierra quemada en la parte inferior. Si tomamos tres regiones características de dicha escena, como pueden ser tierra quemada y rescoldo (TQ), frente de fuego (FF) y llama (LL), claramente definidas en la imagen, y estudiamos los valores de nivel de gris (o número

digital, ND) obtenidos para cada una de ellas, se puede observar en el histograma (figura 1.3) una gran dispersión dentro de cada región y también un solapamiento de los valores entre las diferentes regiones. Este solapamiento hace imposible su discriminación basándose solamente en una umbralización sobre esta imagen. De modo que si nuestro propósito fuera detectar las llamas, la tierra caliente sería una falsa alarma. En realidad, cuerpos grises de más baja temperatura e incluso reflejos solares, pueden dar una señal superior a la producida por una llama, debido a la peculiar “firma espectral” de la llama en el IR (figura 1.1), como ya hemos indicado y veremos en detalle en el **Capítulo 6**.

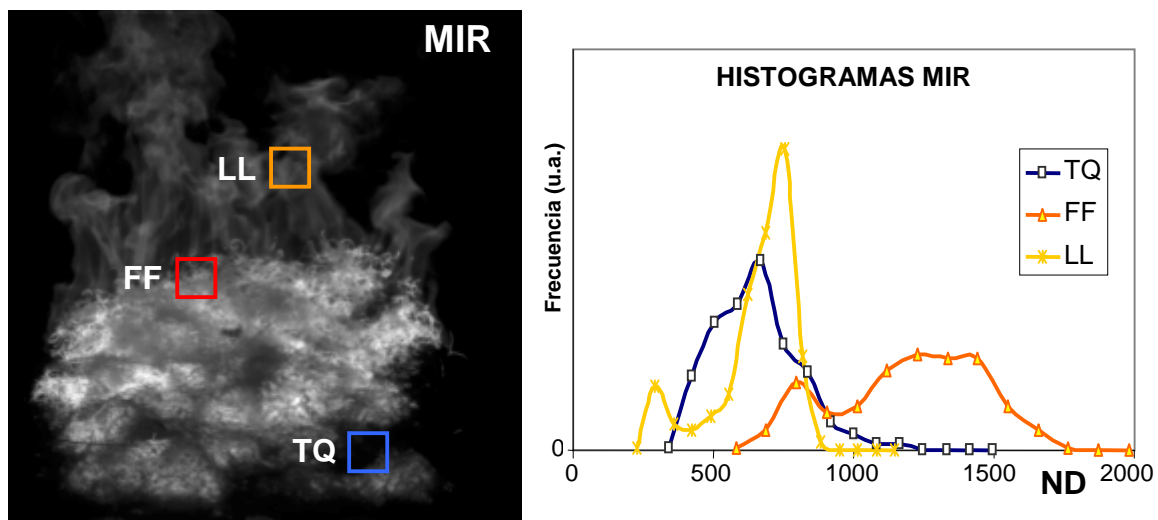


Figura 1.3. – Imagen MIR de una quema de laboratorio de acícula de pino (izquierda) e histogramas de las regiones de interés indicadas (derecha). Obsérvese el solapamiento de los distintos histogramas.

No obstante, *esta característica firma espectral es precisamente la propiedad que nos permite optimizar su detección, si dotamos de la adecuada resolución espectral a las imágenes infrarrojas.*

Este principio es una parte esencial de nuestra propuesta. Podemos apreciar claramente esta idea si representamos los datos de la figura 1.2 de otro modo. En vez de las temperaturas frente a la posición vertical, representamos las temperaturas obtenidas en el infrarrojo medio frente a las obtenidas en el infrarrojo térmico. Obtenemos así un *diagrama de dispersión o dispersograma* (figura 1.4), donde la línea discontinua señala temperaturas iguales que corresponderían a un comportamiento de cuerpo negro (pendiente unidad).

Se observa claramente que hay unos cuantos puntos que se distribuyen paralelamente a la línea de trazos. Estos puntos corresponden al quemador, que tiene un comportamiento de cuerpo negro (aunque también hay presencia de llama y por eso la

temperatura MIR es algo mayor que la TIR). La llama pura corresponde a la rama principal de la gráfica, que asciende con pendiente muy superior a la unidad.

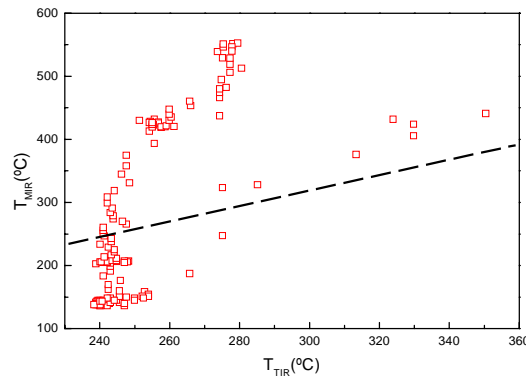


Figura 1.4. – Diagrama de dispersión de los perfiles de temperaturas MIR y TIR de la llama de propano de la figura 1.2 (la línea discontinua representa el comportamiento de cuerpo negro).

Vemos por tanto, que si disponemos de imágenes simultáneas en el IR térmico y medio, podemos en principio distinguir las diferentes zonas de llama y cuerpo negro. Esto es un ejemplo de lo que en teledetección se llama *clasificar* una escena. En el **Capítulo 6** estudiaremos con detalle como el diagrama de dispersión permite clasificar las diferentes regiones de imágenes como la figura 1.3.

En este ejemplo queda patente cómo dotar de resolución espectral a un sistema de imagen infrarroja potencia enormemente la capacidad de esta técnica, incluso aunque se usen sólo dos bandas relativamente anchas. Este cambio no es meramente cuantitativo. Como se verá en el **Capítulo 6**, incorporar una nueva banda espectral supone literalmente añadir una nueva dimensión a la información. La resolución espectral permite resolver con un procesamiento sencillo un problema que era insoluble sólo con la información aportada por la banda MIR.

Espectrometría de imagen

Es importante comprender que para realizar la clasificación que acabamos de describir, las imágenes en las dos bandas deben cumplir estos tres requisitos:

- Correlación temporal: simultaneidad.
- Correlación radiométrica: calibración en temperaturas en cada banda.
- Correlación espacial: co-registración.

Este último punto se refiere a que dos píxeles correspondientes de una y otra imagen deben corresponder a su vez a un mismo punto de la escena. En particular, las dos imágenes deben tener el mismo punto de vista y el mismo campo de visión.

Estos requisitos son muy exigentes, y de hecho no hay ningún sistema de termografía en el mercado que los cumpla. Una parte muy considerable del trabajo descrito en esta memoria se ha encaminado a diseñar e integrar, a partir de equipos de termografía convencionales que trabajan en una sola banda, un sistema con esas prestaciones (**Capítulo 3**). Este sistema será aplicado al estudio de llamas e incendios con el fin de demostrar el principio de la detección biespectral y cuantificar sus posibilidades y dificultades.

Los tres requisitos que hemos planteado, y que no cumplen los sistemas convencionales de termografía IR, son sin embargo familiares en una disciplina distinta: la teledetección desde satélite. En efecto, desde sus inicios en 1972, con el lanzamiento del primer satélite Landsat (entonces llamado ERTS-1, *Earth Resources Technology Satellite 1*) que portaba instrumentación específicamente diseñada para hacer imagen [Mather 01], los satélites meteorológicos y de detección de recursos han embarcado avanzados sistemas ópticos que observan la Tierra en varios canales o bandas espectrales simultáneas, calibradas radiométricamente y co-registradas.

Estos sistemas superan la tradicional división de la instrumentación infrarroja en *sistemas de imagen* (que integran la potencia que les llega de cada punto de la escena en una determinada banda espectral, proporcionando una imagen (figura 1.3 izquierda)), y *sistemas espectrorradiométricos* (que integran para cada longitud de onda la potencia incidente en todo su campo de visión, obteniéndose un espectro (figura 1.1)). Al combinar la resolución espectral con la espacial, estos instrumentos avanzados, denominados genéricamente *espectrómetros de imagen*, son una poderosa herramienta para el estudio de la escena IR, y han motivado el desarrollo de potentes técnicas específicas de procesado. Algunas de estas técnicas, que han sido empleadas en este trabajo, se describen en el **Capítulo 4** de esta memoria.

El sistema que hemos desarrollado con el objetivo de optimizar los procesos de detección en el infrarrojo puede considerarse, pues, *un espectrómetro de imagen biespectral*, [Wolfe 97], el tipo más sencillo posible de espectrómetro de imagen.

En la actualidad existen diferentes equipos *multiespectrales* e *hiperespectrales*. Este aumento en el número de bandas no aporta novedades conceptuales importantes respecto del uso de dos, pero tiene gran utilidad práctica en el estudio de problemas

específicos. Aunque los equipos multi e hiperespectrales se han utilizado ampliamente embarcados en satélite (Landast, NOAA, etc.) y aerotransportados (AIS, AVIRIS), no hay apenas equipos de este tipo que operen desde tierra. En el **Capítulo 7** de esta memoria se describe el trabajo realizado con uno de esos equipos, el IMSS (*Image Multi-Spectral Sensor*). Se trata de un equipo diseñado para trabajar en tierra que proporciona un “banco de pruebas” muy útil para optimizar la selección de bandas y su anchura en el diseño de sistemas multispectrales específicos para el estudio de llamas, monitorización de combustiones, detección de blancos de baja radiancia y pequeñas dimensiones en escenarios abiertos de alto fondo y gran variabilidad, etc.

Relación con la teledetección desde satélite

Este trabajo se propuso en sus comienzos explorar las posibilidades que tenía a priori la termografía IR para el estudio de llamas e incendios forestales, y encontró una solución a las dificultades que planteaba este problema en la aplicación de técnicas desarrolladas inicialmente para la teledetección desde satélite.

Hay que advertir que existe una relación más directa entre la teledetección desde satélites y los incendios forestales. Las imágenes de satélite llevan ya años empleándose para realizar medidas de zona quemada, estudio de deforestación, generación de mapas de riesgo, e incluso monitorización de incendios cuando son de grandes dimensiones [Robinson 91]. En todos los casos se trata de estudios a posteriori, es decir, una vez declarado e incluso sofocado el incendio, y utilizan imágenes procedentes de instrumentos embarcados en satélites (como el AVHRR del NOAA) [Casanova 00][Chuvieco 94] cuya misión principal – para la que fueron lanzados – no es ésta, pero son las únicas disponibles. Actualmente, debido a las graves consecuencias de los incendios forestales en el cambio climático e incluso en la contaminación atmosférica, están en marcha varios proyectos para el lanzamiento de satélites dedicados a su detección precoz y monitorización, como FUEGO [*website 1*], BIRD [*website 2*] (lanzado a finales de 2001) y FOCUS [*website 3*] (éste último se instalará en la estación espacial internacional ISS). Estos satélites utilizan la detección biespectral en las bandas MIR y TIR como elemento clave para detectar incendios y proporcionar información cuantitativa sobre ellos. Su lanzamiento hace por tanto más relevante el trabajo aquí descrito, puesto que tanto las medidas realizadas con imágenes de satélites, como las técnicas de procesamiento empleadas necesitarán en un futuro próximo ser validadas con medidas realizadas en tierra.

Objetivos de la tesis

El trabajo expuesto en esta memoria ha sido realizado en el Laboratorio de Sensores Teledetección e Imagen Infrarroja (LIR) del Departamento de Física de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid. En este marco se ha desarrollado un trabajo en el que convergen la física aplicada, la integración de sistemas y la aplicación de técnicas de procesamiento espectral de imagen, con el **objetivo general** de desarrollar métodos que optimicen los procesos de detección mediante imagen IR de fenómenos con una marcada estructura espectral. Este es el caso del estudio de llamas y de la detección precoz de incendios forestales, pero también de cualquier sustancia, material o proceso cuyo comportamiento como emisor IR se desvíe de manera importante del comportamiento de un cuerpo negro, como ocurre con los gases.

La optimización de los procesos de detección se basa en utilizar las propiedades espectrales de los objetos emisores junto con la información espacial, para lo que ha sido preciso dotar de resolución espectral a las imágenes IR. Por esta razón, un **primer objetivo** ha sido el diseño y construcción de un espectrómetro de imagen biespectral IR a partir de dos cámaras IR. Este instrumento ha sido calibrado y puesto a punto para su trabajo en laboratorio, en campo y aerotransportado. Un **segundo objetivo** ha sido el desarrollo de métodos que optimicen la detección, basados en técnicas de procesamiento espectral de imagen IR inicialmente establecidas en la teledetección desde satélite. Estas técnicas han sido modificadas para adecuarlas al procesamiento de las imágenes biespectrales obtenidas, y verificadas en el estudio de llamas y en la teledetección de incendios forestales. Por último, estos métodos se han extendido a nuevas propuestas de detección basadas en el análisis hiperespectral del escenario IR, como la generación de mapas de temperatura de llamas, la visualización y el análisis de nubes de gases y la detección de combustiones en ambientes de alto ruido de fondo IR.

Acerca de esta memoria

En el **capítulo 2** se analizan todos los elementos que intervienen en el proceso de teledetección IR, es decir los elementos de un sistema electro-óptico: fuente, medio y sistema sensor. Se hace especial hincapié en los fundamentos físicos que gobiernan la emisión, transmisión y detección en teledetección e imagen infrarroja. Se revisan los principales hitos en la historia del desarrollo de la tecnología de los sistemas de imagen IR y se describe su funcionamiento y explican los fundamentos de su utilización para la

medida de temperaturas, incluyendo nociones básicas de la calibración radiométrica. También se expone el concepto de espectrometría de imagen IR.

En el **capítulo 3** se describe detalladamente el diseño y desarrollo del espectrómetro biespectral de imagen IR realizado para la adquisición de imágenes en laboratorio, así como los elementos que lo componen. También se detallan las modificaciones necesarias para realizar medidas de campo desde tierra y también embarcado en helicóptero. Se muestra también las características, funcionamiento y puesta a punto del espectrómetro hiperespectral de imagen IR utilizado.

El **capítulo 4** expone las técnicas de procesado que se utilizarán sobre las imágenes adquiridas con el sistema biespectral IR. En primer lugar se explica el *preprocesado* que comprende los siguientes procesos: acondicionamiento de las imágenes MIR y TIR, co-registración y calibración en radiancias y temperaturas, para concluir con el procesado propiamente dicho, que incluye técnicas de clasificación habituales en teledetección desde satélite.

En el **capítulo 5** se realiza una primera aproximación a la optimización de la detección mediante imagen IR y reducción de la tasa de falsas alarmas mediante la aplicación de los denominados *índices de fuego intrabanda* (en el infrarrojo medio), e *interbanda* (en el infrarrojo medio y térmico) para la detección de fuego en laboratorio y en campo.

En el **capítulo 6** se aplicarán las técnicas de procesado descritas sobre las imágenes adquiridas con el espectrómetro biespectral IR, para la clasificación del escenario infrarrojo; en primer lugar, en llamas y quemas de laboratorio y posteriormente en quemas de campo. También se hace un estudio de la influencia de la distancia y la presencia de reflejos solares. Se demuestra así la validez de la metodología presentada en este trabajo para la teledetección precoz de incendios forestales y la clasificación del escenario.

En el **capítulo 7** se extiende el principio de detección IR espectral y se estudian las enormes posibilidades que el aumento de resolución espectral y el incremento del número de bandas tiene en la optimización de la detección. Para ello se utilizará un espectrómetro de imagen de alta resolución en el infrarrojo medio, que permitirá seleccionar el número de bandas y definir su anchura para optimizar los procesos de detección mediante imagen IR en gran número de aplicaciones que van desde la separabilidad de gases en una mezcla (visualización de gases de combustión), hasta la detección de blancos en escenarios de elevado ruido ambiental. Se estudia también la

aplicabilidad de la espectrometría de imagen IR para la determinación de la temperatura real de llamas, para lo cual se comparan las temperaturas proporcionadas por diferentes métodos de medida.

Finalmente en el **capítulo 8**, se resumen las conclusiones desprendidas de este trabajo y se perfilan las perspectivas abiertas y las líneas futuras de trabajo.

Capítulo 2

Fundamentos de la teledetección e imagen infrarroja

La palabra “teledetección” es una traducción directa del término inglés *remote sensing* y se refiere a la adquisición de información sobre un objeto sin contacto físico [Simonett 83]. Es una disciplina relativamente nueva (el término fue acuñado a principio de los 60) y que tomó gran importancia desde los inicios de la carrera espacial. Aunque se debe señalar que la fotografía aérea ha sido el primer campo de la teledetección, cuando se utiliza hoy este término es en un sentido más amplio y se refiere sobre todo a las imágenes y mediciones realizadas tanto desde aviones como desde satélites, por *sistemas electro-ópticos* embarcados que responden al esquema de la figura 2.1. Pero esta disciplina no sólo engloba la adquisición de imágenes, sino también su procesamiento posterior encaminado a una aplicación concreta.

La teledetección se realiza en muchas regiones del espectro electromagnético, desde el ultravioleta hasta las microondas. No obstante, nos limitaremos a la teledetección infrarroja, que es el campo donde se engloba nuestro trabajo. Una de las características que diferencia la teledetección IR respecto de otras bandas es la importancia de la radiación emitida por los cuerpos objetos de estudio, y no sólo de la radiación reflejada, como ocurre en el visible y en el infrarrojo próximo.

En este capítulo se presentan brevemente los fundamentos físicos de los sistemas de teledetección e imagen infrarroja. Comenzamos por la enumeración de los elementos que conforman un sistema electro-óptico de teledetección, para posteriormente exponer de una forma más detallada cada uno de estos elementos y las leyes físicas que rigen la emisión, transmisión y detección de la radiación IR. En este capítulo también se hace una reseña histórica de la evolución que ha seguido la detección de radiación IR, desde

su descubrimiento a principios del siglo XIX, hasta llegar a los complejos sistemas utilizados en nuestros días, como cámaras infrarrojas y sistemas hiperspectrales.

2.1. Elementos de un sistema electro-óptico de teledetección

En el proceso de teledetección hay tres elementos básicos: *la fuente de radiación*, *el medio* en el que se propaga dicha radiación, y *el sistema sensor*. Denominaremos *sistema electro-óptico* al conjunto de estos tres elementos (aunque algunos autores reservan este nombre para el sistema sensor). Dentro del sistema sensor hay que distinguir tres subsistemas: *la óptica*, *el detector* y *la electrónica de lectura y acondicionamiento de la señal*. La salida del sistema sensor será una señal eléctrica, generalmente digital, que tendrá cierta relación con la radiación emitida por la fuente. En la sección 2.6 estudiaremos esta relación; por el momento, empezaremos por describir los distintos elementos del sistema. En la figura 2.1 queda esquematizado mediante un diagrama de bloques un sistema electro-óptico genérico [Wyatt 91].

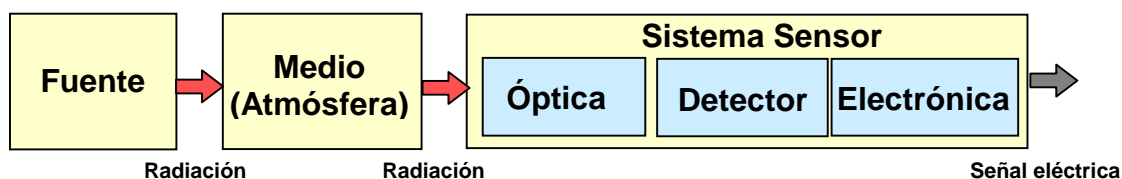


Figura 2.1 - Diagrama de bloques genérico de un sistema electro-óptico.

Este esquema es representativo de muy diversas aplicaciones, tales como seguimiento y guiado de misiles, comunicaciones punto a punto de imágenes o de datos, medidas en laboratorio y teledetección bien sea desde satélite, aerotransportada, o desde tierra. Los diferentes sistemas sensores que se emplean en teledetección pueden tener resolución espacial (sistemas formadores de imagen), resolución espectral (espectrorradiómetros o espectrofotómetros) o ambas (espectrómetros de imagen).

En nuestro caso, la aplicación del sistema electro-óptico va a ser la teledetección mediante un espectrómetro de imagen IR, en laboratorio, en tierra o incluso aerotransportado, como se verá más adelante.

A continuación se describe más detalladamente cada uno de los elementos que intervienen en este caso concreto.

La fuente de radiación

La teledetección puede dividirse en dos tipos atendiendo al uso que se haga de *las fuentes de radiación*. La *teledetección activa* consiste en utilizar una fuente de radiación artificial “iluminando” la escena objeto de estudio, en cuyo caso la radiación detectada por el sistema sería la reflejada, transmitida o dispersada por dicha escena [Wyatt 91] [Chuvieco 96] [Schott 97]. El ejemplo más típico de este tipo de teledetección es el radar, donde la radiación detectada es la reflejada; en el caso del infrarrojo, las fuentes utilizadas suelen ser cuerpos negros de laboratorio y la radiación detectada puede ser la reflejada o la transmitida, dependiendo de la configuración de la medida.

En la *teledetección pasiva* las únicas fuentes que se utilizan son las naturales (el sol en el visible, por ejemplo). En el infrarrojo, sin embargo, no son necesarias ni siquiera fuentes naturales, ya que la fuente puede ser el propio cuerpo a detectar. En teledetección activa las medidas pueden ser más precisas, ya que las fuentes de radiación empleadas están controladas, pero ello incrementa la complejidad de la medida y provoca grandes dificultades en medidas de campo y desde satélite en algunas zonas del espectro.

En este trabajo, nos limitaremos a la región IR y el modo utilizado será el pasivo, utilizando como fuente la emisión propia en el infrarrojo de los cuerpos y sustancias objeto de estudio; aunque, naturalmente, se deberán considerar también otras contribuciones dependiendo de las condiciones de la medida, como se detallará en la sección 2.6.

El medio

En nuestro caso *el medio* en el que se propaga la radiación será la atmósfera. Como estudiaremos más adelante (sección 2.3), su comportamiento es muy diferente dependiendo de la zona del espectro electromagnético en la que se trabaje.

La óptica

La radiación emitida por la fuente y modificada por el medio es enfocada por la *óptica* sobre el detector. La combinación de óptica y detector determina el intervalo espectral de trabajo y la resolución en los dominios espacial y espectral, condicionando además el rango dinámico de trabajo y con ello la resolución radiométrica. El diseño del sistema óptico debe optimizar estas resoluciones para cada aplicación concreta y por tanto puede ser muy diferente, desde simples objetivos hasta complejos sistemas de lentes y espejos,

con diferentes índices de refracción y formas especiales para reducir aberraciones y optimizar la calidad de la imagen [Riedl 95] [Wolfe 96] [Wolfe 99].

Sin embargo, como veremos en el apartado 2.2.5, para un sistema óptico ideal los parámetros más importantes se pueden reducir a dos, el *número F* ($F/\#$) y el campo de visión (FOV, *Field Of View*). Ambos afectan a la transferencia de potencia y a la calidad de la imagen. Un sistema con un pequeño $F/\#$ y un gran FOV hace que la eficiencia en la transferencia de potencia sea alta a costa de la calidad de la imagen, que sufre grandes aberraciones. Por el contrario, un sistema con $F/\#$ grande y pequeño FOV tiende a presentar una imagen de mayor calidad pero la potencia que llega al detector es menor [Dereniak 96]. Son estos parámetros los que determinan la luminosidad de la óptica y condicionan por tanto el rango dinámico y la resolución radiométrica del sistema. En las aplicaciones que estudiaremos, este rango dinámico es un parámetro crítico y será necesaria la utilización de filtros ópticos y diafragmas para optimizarlo, atenuando la radiación que llega al detector.

La banda espectral de trabajo, dentro del intervalo espectral permitido por el detector, queda determinada por la óptica mediante recubrimientos multicapa y el uso de filtros interferenciales. Por otro lado, para dotar de cierta resolución espectral a sistemas que utilizan una banda muy ancha del espectro electromagnético, se pueden utilizar diferentes soluciones como filtros interferenciales, redes de difracción, interferómetros de Michelson, etc.

El detector

El *detector* es el elemento central de un sistema electro-óptico. Su función básica es suministrar una señal medible proporcional a la potencia electromagnética que incide sobre él. Podemos decir que un detector es un transductor: la energía electromagnética modifica alguna propiedad del detector, y este cambio es medido y transformado en señal eléctrica. Existe una gran variedad de detectores de radiación IR, de los cuales la mayoría necesitan ser refrigerados para alcanzar su temperatura óptima de trabajo (apartado 2.4.2).

La electrónica de lectura y acondicionamiento de señal

La *electrónica de lectura y de acondicionamiento de señal* es imprescindible para extraer información de la radiación detectada, una vez transformada en señal eléctrica.

El detector tiene como salida una señal analógica de bajo nivel. Esta señal debe ser preamplificada con la ganancia adecuada, para que el límite del ruido del sistema quede fijado por el propio detector, y no por la electrónica de lectura, y también para que la contribución al ruido del resto de la electrónica sea despreciable [Hudson 69]. El *preamplificador* es pues, el elemento crítico de la electrónica empleada en estos sistemas. Una vez preamplificada la señal se digitaliza mediante un conversor analógico-digital. Posteriormente, la señal es acondicionada y procesada para proporcionar una señal de salida utilizable por otros sistemas (apartado 2.4.3).

Algunos de los sistemas electro-ópticos que forman imagen están provistos de la electrónica necesaria para producir una salida de vídeo compuesto (y por tanto analógica), y también una salida digital de datos. La primera de ellas se puede visualizar mediante cualquier monitor o visor estándar, mientras que para la visualización de la salida digital se necesitan tarjetas de adquisición específicas instaladas en un ordenador.

Una vez descritos de forma general todos los elementos que componen un sistema electro-óptico, vamos a realizar una revisión de sus fundamentos físicos y tecnológicos, comenzando por la propia radiación IR y sus mecanismos de emisión.

2.2. Radiación electromagnética

Los trabajos de Hertz en 1886 demostraron la existencia de ondas electromagnéticas, que habían sido predichas a partir de las ecuaciones de Maxwell en 1873. Esta radiación electromagnética puede tener longitudes de onda (y por tanto frecuencias) muy diversas, lo que implica que sus propiedades físicas varíen y se hable de “tipos de radiación” a pesar de tratarse esencialmente del mismo fenómeno.

2.2.1. El espectro electromagnético

En el espectro electromagnético se distinguen diferentes regiones atendiendo a las diversas longitudes de onda, como se refleja en la figura 2.2. Los límites de cada una de las regiones no son absolutos y sus denominaciones se deben a causas muy dispares ligadas al mecanismo que produce ese tipo de radiación, a su posición respecto de la zona del espectro conocido hasta el momento, a su utilización, etc.

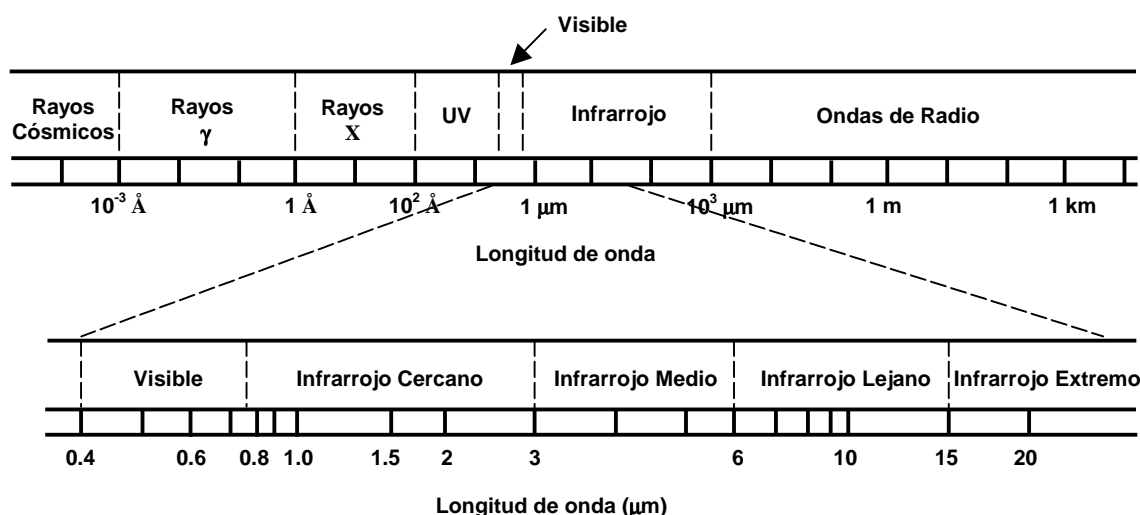


Figura 2.2. – Espectro electromagnético.

La región del espectro correspondiente a la radiación IR, donde trabajaremos, se puede subdividir en varias regiones, aunque esta subdivisión varía según los diferentes autores. Hudson [Hudson 69] distingue: Infrarrojo cercano (NIR) entre $0.75 - 3 \mu\text{m}$; infrarrojo medio (MIR) entre $3 - 6 \mu\text{m}$; infrarrojo lejano (LIR) entre $6 - 15 \mu\text{m}$ e infrarrojo extremo (XIR) $15 - 1000 \mu\text{m}$ (las siglas corresponden a su denominación en inglés). La nomenclatura y los límites varían si se tienen en cuenta las ventanas de transmisión atmosférica (apartado 2.3.2), denominándose infrarrojo medio, **MIR**, a la zona comprendida entre $3 - 5 \mu\text{m}$ e infrarrojo térmico, **TIR**, a la comprendida entre $8 - 12 \mu\text{m}$ (o incluso entre $8 - 14 \mu\text{m}$). Estas son precisamente las dos bandas espectrales donde se va a desarrollar todo el trabajo que aquí se presenta.

2.2.2. El descubrimiento de la radiación infrarroja y su estudio

Los primeros indicios de la presencia de la radiación infrarroja se remontan a finales del siglo XVIII, pero no fue hasta el año 1800 cuando el astrónomo inglés Sir William Herschel demostró experimentalmente su existencia. Herschel investigaba la reducción del brillo de las imágenes solares mediante filtros de vidrio coloreado. Para estudiar los efectos del calentamiento que la luz solar producía en sus filtros, diseñó un experimento en el cual, en una sala en penumbra, hacía pasar un haz de luz solar a través de un prisma de vidrio, descomponiendo ésta en su espectro y haciendo incidir cada color sobre un termómetro de mercurio. Comprobó que la temperatura era mayor en la zona del rojo que en la correspondiente al azul. Moviendo el termómetro hacia la

zona posterior al rojo y fuera del espectro visible, observó no sólo que los efectos caloríficos persistían, sino que además se incrementaban, alcanzando el máximo en la región del espectro que hoy conocemos como infrarrojo. Herschel denominó a la nueva radiación con términos como *rayos invisibles*, y *espectro termométrico* entre otros [Hudson 69] (el término *infrarrojo* no comenzó a utilizarse en la literatura hasta 1869 [Dauguet 64]).

Herschel usó también este sistema para medir la radiación emitida por fuegos, candelabros, etc, incluso a través de filtros de diferentes materiales, y se planteó también la similitud entre la luz y la *radiación invisible*.

En 1835, Ampère sostuvo que ambas son de origen ondulatorio y se diferencian en su longitud de onda. Fizeau y Foucault pudieron confirmar definitivamente esta teoría mediante un experimento de interferencias, asignando una longitud de onda a esta *radiación invisible*.

Llevó mucho tiempo extender estas medidas de longitudes de onda a toda la región infrarroja. La tabla 2.1 refleja su evolución a lo largo del tiempo [Dauguet 64].

Año	Autores	Longitud de onda (μm)
1847	Fizeau y Foucault	1.5
1859	Muller	1.9
1879	Mouton	2.14
1880	Desains y Curie	7
1897	Rubens y Paschen	20
1900	Rubens y Nichols	150
1913	Rubens y Von Bayer	310

Tabla 2.1. - Medida de longitudes de onda en el infrarrojo

Paralelamente a estos progresos experimentales, en la segunda mitad del siglo XIX se realizaron importantes avances teóricos, que culminaron en la ley de Planck y que están por tanto en el origen de la *mecánica cuántica*. Se trataba de explicar la distribución energética espectral de un radiador térmico, es decir, de un cuerpo que emite radiación exclusivamente en virtud de su temperatura.

En 1860 Kirchhoff propuso su famosa ley en la cual establecía que los cuerpos que son buenos absorbentes son a la vez buenos radiadores. También propuso el término *cuerpo negro*, para describir a un cuerpo ideal que absorbe toda la radiación que le llega, y que por tanto, de acuerdo con su ley, también debe ser el radiador más

eficiente. Por ello, el cuerpo negro será el radiador de referencia para comparar cualquier tipo de fuente de radiación.

En 1879 Stefan dedujo de medidas experimentales que la energía total emitida por un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Boltzmann en 1884 llegó a la misma conclusión utilizando argumentos termodinámicos; por esta razón, dicha ley se conoce con el nombre de ambos.

Wien en 1894 publicó la *ley de desplazamiento*; en este trabajo propone una expresión de la distribución espectral de la radiación emitida por un cuerpo negro, pero dicha expresión sólo concordaba con las medidas experimentales para longitudes de onda cortas y bajas temperaturas del cuerpo negro. Un importante resultado de esta ley fue la relación de la temperatura absoluta de emisión del cuerpo negro con la longitud de onda para la cual se produce el máximo de emisión de energía radiada. En 1900 Rayleigh fue capaz de ajustar datos experimentales para la emisión a longitudes de onda largas y altas temperaturas del cuerpo negro. Sin embargo, su expresión predecía que la energía emitida tendía a infinito según decrecían las longitudes de onda, por lo que esta predicción se conoció como *catástrofe ultravioleta*. A finales del mismo año, Planck presentó una expresión obtenida a partir de la interpolación de las de Wien y Rayleigh, cuya validez se extendía a todas las longitudes y fue corroborada poco después por los resultados experimentales de Rubens y Kurlbaum [Hudson 69].

En otro trabajo también a finales de 1900, Planck consiguió deducir teóricamente su fórmula, proponiendo que un radiador térmico estaría constituido por osciladores que emitiesen en todas las frecuencias posibles, es decir de manera continua, pero donde sus amplitudes, y por ello sus energías estarían restringidas diferenciándose unas de otras en unas cantidades discretas. Estas cantidades, denominadas *quantum*, tendrían un valor igual a $h\nu$, donde ν es la frecuencia a la que es emitida la energía y h es la constante de proporcionalidad que Planck encontró ajustando los datos experimentales obtenidos. En la actualidad sabemos que esta constante es universal y es conocida con el nombre de *constante de Planck*.

2.2.3. Leyes de la radiación

Como hemos visto, el estudio teórico de la radiación térmica culminó en la ley de Planck, considerada hoy como ley fundamental de la radiación, de la cual las leyes de Wien y Stefan-Boltzman son casos particulares.

Ley de Planck

La ley de Planck describe la emisión espectral de la radiación de un cuerpo negro que está a una temperatura absoluta T . Su exitancia espectral (potencia emitida por unidad de área e intervalo espectral) viene dada por la siguiente expresión:

$$M^{\text{CN}}(\lambda) = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k T}\right) - 1} \quad [2.1]$$

donde¹:

$M^{\text{CN}}(\lambda)$ = exitancia espectral (medida habitualmente en $\text{W}/\text{cm}^2 \mu\text{m}$)

λ = longitud de onda (medida habitualmente μm)

h = constante de Planck = $(6.6256 \pm 0.0005) \cdot 10^{-34} \text{ J s}$

T = temperatura absoluta (K)

c = velocidad de la luz = $(2.997925 \pm 0.000003) \cdot 10^{10} \text{ cm/s}$

k = constante de Boltzmann = $(1.38054 \pm 0.00018) \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

$c_1 = 2\pi h c^2$ = primera constante de radiación = $(3.7415 \pm 0.0003) 10^4 \text{ W } \mu\text{m}^4 / \text{cm}^2$

$c_2 = hc/k$ = segunda constante de radiación = $(1.43879 \pm 0.00019) \cdot 10^4 \mu\text{m K}$

A partir de la ley de Planck, se pueden obtener las aproximaciones que le precedieron históricamente:

Aproximación de Wien

Para longitudes de onda corta y para temperaturas bajas se cumple que:

$$\lambda T \ll \frac{hc}{k} . \text{ Se puede admitir la aproximación } \exp\left(\frac{hc}{\lambda k T}\right) - 1 \cong \exp \frac{hc}{\lambda k T}$$

quedando entonces:

$$M^{\text{CN}}(\lambda) \cong \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda k T}\right) \quad [2.2]$$

(Esta expresión se considera válida si $\lambda T < 5 \cdot 10^3 \mu\text{m K}$ [Gaussourgues 89]).

¹ Estos valores para las constantes son los recomendados en 1963 por el *Committee on Fundamental Constants of the National Academy of Sciences – National Research Council* [Hudson 69].

Aproximación de Rayleigh-Jeans²

Para longitudes de onda largas y temperaturas altas tenemos que $\lambda T \gg \frac{hc}{k}$, y por

tanto, $\exp \frac{hc}{\lambda kT} - 1 \cong \left(1 + \frac{hc}{\lambda kT} + \dots\right) - 1 \cong \frac{hc}{\lambda kT}$ quedando entonces:

$$M^{\text{CN}}(\lambda) \cong \frac{2\pi ckT}{\lambda^4} \quad [2.3]$$

(Esta expresión se considera válida cuando $\lambda T > 5 \cdot 10^3 \mu\text{K}$ [Gaussourgues 89]).

En la siguiente gráfica (figura 2.3) aparecen las curvas de la exitancia espectral de un cuerpo negro a diferentes temperaturas.

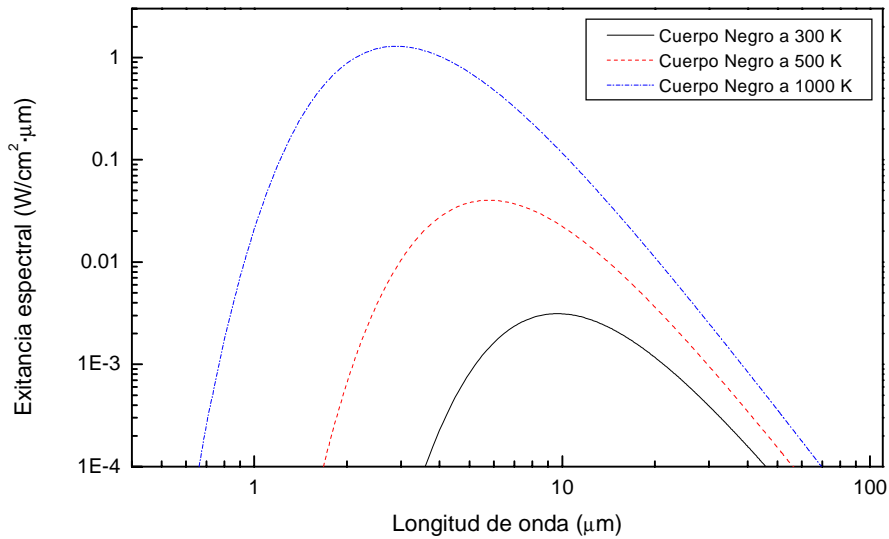


Figura 2.3 – Exitancia espectral de un cuerpo negro a varias temperaturas.

Ley de desplazamiento de Wien

Las curvas de distribución espectral de la radiación del cuerpo negro, como se aprecia en la figura 2.3, alcanzan un máximo de emisión para cada temperatura a una longitud de onda determinada. El desplazamiento de este máximo lo describe la ley de Wien, que se puede obtener por derivación de la ley de Planck, resolviendo para el máximo. Se obtiene que:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{a}{T} \quad [2.4]$$

² En 1905 Jeans en una carta a *Nature* indicó un error numérico en la expresión de Rayleigh, por ello dicha aproximación se conoce con el nombre de ambos [Hudson 69].

λ_{\max} = longitud de onda donde se produce el máximo de emisión espectral

T = temperatura del cuerpo negro. Expresando λ_{\max} en μm y la temperatura en K se tiene que,

$a = 2897.8 \pm 0.04 \mu\text{mK}$ [Hudson 69]

Ley de Stefan-Boltzmann

La ley de Stefan-Boltzmann relaciona la exitancia total de un cuerpo negro con su temperatura. Se obtiene por integración de la ley de Planck a todas las longitudes de onda, es decir desde cero a infinito:

$$M^{\text{CN}} = \int_0^{\infty} M^{\text{CN}}(\lambda) d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4 \quad [2.5]$$

M^{CN} = exitancia total emitida por un cuerpo negro

σ = constante de Stefan-Boltzmann = $(5.6697 \pm 0.0029) \cdot 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}^4$

La ley de Stefan-Boltzmann representa el área bajo las curvas de la figura 2.3, estableciendo que la exitancia total emitida es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta. Esto nos indica que pequeñas variaciones de la temperatura pueden provocar grandes cambios en la exitancia emitida.

Emisividad

Kirchhoff estableció que el *cuerpo negro* es una idealización del radiador más eficiente posible. Las expresiones que hemos visto para un cuerpo negro podremos utilizarlas para cualquier fuente si tenemos en cuenta cual es su eficiencia como radiador. Este factor se conoce como *emisividad*, ε , y está definido por la relación entre la exitancia espectral de la fuente a una temperatura determinada $M(\lambda, T)$ respecto de la del cuerpo negro a la misma temperatura, $M^{\text{CN}}(\lambda, T)$.

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{M(\lambda, T)}{M^{\text{CN}}(\lambda, T)} \quad [2.6]$$

Lógicamente la emisividad es un factor adimensional y cuyo valor está comprendido entre 0 y 1. Es función del tipo de material, de las características de su superficie y de la longitud de onda. Además para un determinado material la emisividad depende también de su temperatura y de la dirección de observación. En la mayoría de los casos la emisividad se suele calcular para incidencia normal y en una banda espectral determinada $\Delta\lambda$:

$$\varepsilon = \frac{\int_{\Delta\lambda} \varepsilon(\lambda) M(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} M(\lambda, T) d\lambda} \quad [2.7]$$

Los cuerpos se pueden clasificar en cuanto a su emisividad espectral en tres tipos, como se muestra en la figura 2.4:

- Cuerpo negro: emisividad espectral constante e igual a la unidad, $\varepsilon(\lambda) = \varepsilon = 1$.
- Cuerpos grises: emisividad espectral constante pero menor que la unidad, $\varepsilon(\lambda) = \varepsilon < 1$.
- Cuerpos selectivos: su emisividad varía con la longitud de onda $\varepsilon(\lambda) \leq 1$.

En la mayoría de las aplicaciones los sólidos y líquidos pueden considerarse como cuerpos grises, mientras que en los gases, como veremos más adelante, la emisividad tiene una acusada dependencia espectral.

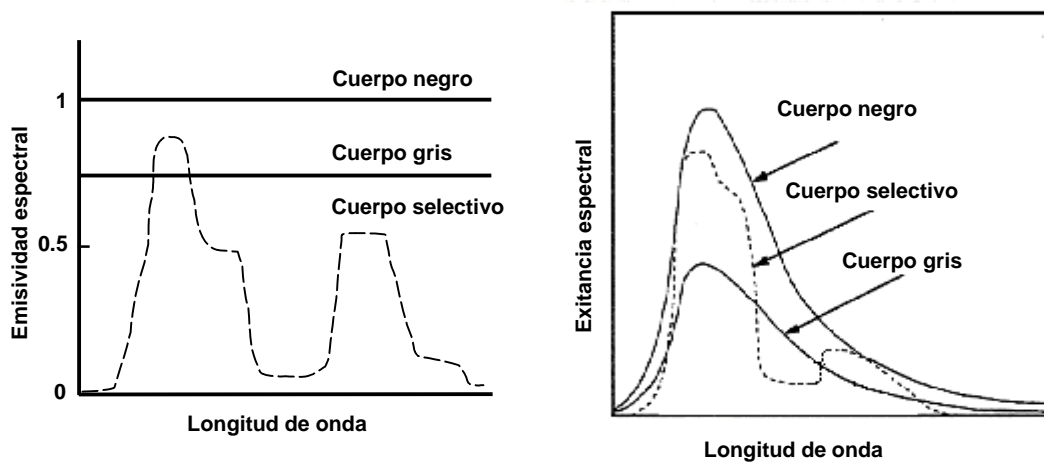


Figura 2.4- Emisividad espectral y tipos de fuentes de radiación según su emisividad.

Absortancia, reflectancia y transmitancia. Ley de Kirchhoff

Cuando un haz de radiación incide sobre un cuerpo, una fracción de esa energía incidente es absorbida (α), otra es reflejada (ρ), y otra es transmitida (τ). Como la energía debe conservarse, la suma de todas esas fracciones debe ser la unidad:

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad [2.8]$$

$\alpha(\lambda)$ = absortancia espectral

$\rho(\lambda)$ = reflectancia espectral

$\tau(\lambda)$ = transmitancia espectral

Para un cuerpo negro, por definición, tendremos que $\alpha = 1$ y en consecuencia $\rho = \tau = 0$. Kirchhoff demostró, al estudiar los procesos de transferencia de energía por radiación,

que para todos los cuerpos en equilibrio termodinámico a una temperatura dada, la relación entre la exitancia espectral emitida y la absortancia era constante e igual a la exitancia espectral emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura [Hudson 69], estableciendo lo que conocemos como *ley de Kirchhoff*:

$$\frac{M(\lambda)}{\alpha(\lambda)} = M^{\text{CN}}(\lambda) \quad [2.9]$$

Comparando con la expresión [2.6] se obtiene que:

$$\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda) \quad [2.10]$$

De modo que los cuerpos que mejor absorben la radiación son también los mejores emisores.

Para un cuerpo opaco la transmitancia es cero, $\tau = 0$, de manera que teniendo en cuenta [2.10], la expresión [2.8] queda de la forma,

$$\varepsilon = (1 - \rho) \quad [2.11]$$

Por otra parte, para un gas $\rho = 0$, de modo que [2.8] queda,

$$\varepsilon = (1 - \tau) \quad [2.12]$$

2.2.4. Radiometría. Conceptos básicos

La radiometría es la parte de la óptica que se ocupa de la medida de la energía electromagnética transferida por radiación. La medida de la radiación en el espectro visible se denomina fotometría. Dado que nuestro trabajo se centra en la zona del infrarrojo, nos referiremos en todo momento a las magnitudes radiométricas, válidas para todo el espectro electromagnético, aunque en la zona del visible se utiliza otra nomenclatura y otras unidades.

En primer lugar, antes de abordar la definición de las diferentes magnitudes radiométricas que utilizaremos, es necesario señalar que la nomenclatura y simbología varían de unos autores a otros. En este trabajo la nomenclatura y símbolos utilizados son los aprobados en 1967 y recomendados para su uso por la IUPAP, ISO comité 42 y por la CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*), que aparecen en el Apéndice 2 de [Hudson 69]³.

La energía que portan las ondas electromagnéticas se denomina *energía radiante*, Q [J]. Esta magnitud describe la energía radiada por una fuente en un intervalo

³ Paradójicamente este autor, aun siendo miembro de dicha comisión, utiliza en su libro una simbología diferente muy utilizada en Estados Unidos.

de tiempo dado. En infrarrojo utilizaremos detectores que responden a la potencia incidente sobre ellos con un tiempo de respuesta o *tiempo de integración* determinado. Esto hace que sea mucho más práctico utilizar como magnitud para caracterizar la radiación incidente el *flujo radiante* o *potencia radiante*, Φ [W]. Lógicamente la potencia detectada dependerá del área del detector, por lo que es conveniente definir una magnitud que represente la potencia incidente por unidad de área, denominada genéricamente *densidad de flujo*. No obstante, el nombre de esta magnitud varía en función de que la potencia por unidad de área sea detectada, y entonces se denomina, *irradiancia* E [W/m²]; o emitida, en cuyo caso se denomina *exitancia*, M [W/m²]. La *intensidad* I [W/sr] de una fuente es la potencia radiante por unidad de ángulo sólido.

El objetivo de los cálculos radiométricos suele ser estimar la irradiancia que una determinada fuente, de exitancia conocida, produce sobre el detector, o bien conocer la exitancia de una fuente a partir de la irradiancia detectada. Para realizar estos cálculos es conveniente definir una nueva magnitud: la *radiancia*, L [W/m²sr].

Definición de radiancia. Invariancia de la radiancia

La radiación electromagnética que partiendo del emisor llega al detector puede describirse mediante rayos, cada uno de los cuales tendrá asociada una cierta “intensidad”. Intuitivamente la radiancia será la medida de la “intensidad del rayo” en un punto determinado del espacio. Con más precisión, si tomamos un elemento diferencial de superficie emisora dA situado en el punto (x, y) y consideramos un ángulo sólido diferencial, $d\omega$, en una dirección que forma un ángulo θ con la normal (figura 2.5), llamando $d^2\Phi$ a la potencia total de los rayos que salen del elemento de superficie dA dentro del ángulo sólido considerado, definimos la radiancia, L , como

$$L(x, y, \theta, \varphi) = \frac{d^2\Phi(x, y, \theta, \varphi)}{d\omega(\theta, \varphi) dA(x, y) \cos\theta} \quad [\text{W/m}^2\cdot\text{sr}] \quad [2.13]$$

La radiancia, L , es por tanto función de la posición espacial y de la dirección, y representa la potencia emitida por unidad de ángulo sólido y de área proyectada en la dirección del rayo. A su vez, esta invariancia de la radiancia nos permite considerar al rayo como un tubo diferencial de flujo, caracterizado por una radiancia determinada. La radiancia puede definirse análogamente en función de la potencia detectada, o incluso en un punto cualquiera a lo largo de un rayo. Nos da una caracterización completa de la distribución espacial y angular de la radiación.

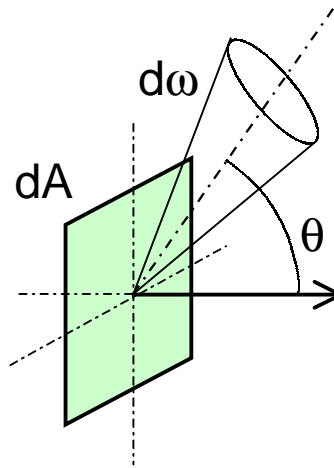


Figura 2.5- Definición de radiancia.

La utilidad de la radiancia radica, en gran parte, en su propiedad de invariancia. [Nicodemus 63]. Para obtener esta propiedad vamos a calcular la radiancia en dos puntos de un rayo en un medio homogéneo e isótropo y no absorbente. Sea un rayo en una dirección cualquiera, y consideremos como puntos de estudio el punto 1 y el punto 2, separados una distancia d . Consideremos también un elemento diferencial de área en cada uno de esos puntos, dA_1 , dA_2 , cuyas normales forman ángulos θ_1 y θ_2 con la dirección del rayo. Sea $d\omega_{12}$, el ángulo sólido subtendido por dA_2 , visto desde 1 y $d\omega_{21}$ el subtendido por dA_1 visto desde 2 (figura 2.6).

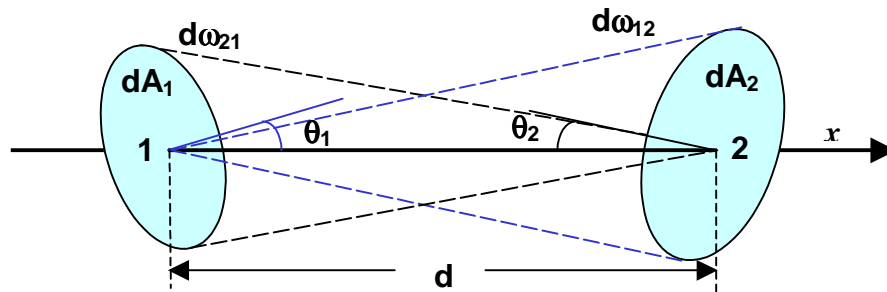


Figura 2.6- Invariancia de la radiancia.

La radiancia en el punto 1, en la dirección del rayo, la podemos calcular en función del flujo saliente $d^2\Phi_{12}$ desde ese punto y que llega a dA_2 como (se omiten las dependencias espaciales y angulares señaladas en la expresión [2.13] para mayor claridad),

$$L_1 = \frac{d^2\Phi_{12}}{d\omega_{12}dA_1\cos\theta_1} \quad [2.14]$$

De la misma forma la radiancia que llega al punto 2 en la dirección del rayo será (calculada en función del flujo entrante),

$$L_2 = \frac{d^2 \Phi_{12}}{d\omega_{21} dA_2 \cos \theta_2} \quad [2.15]$$

De la figura 2.6 obtenemos que,

$$d\omega_{21} = \frac{dA_1 \cos \theta_1}{d^2} \quad ; \quad d\omega_{12} = \frac{dA_2 \cos \theta_2}{d^2} \quad [2.16]$$

Sustituyendo [2.16] en [2.14] y [2.15] obtenemos que la radiancia es constante a lo largo de un rayo:

$$L_1 = L_2 \quad [2.17]$$

2.2.5. Radiometría. Cálculos radiométricos

En la definición de radiancia dada por la expresión [2.13], la notación utilizada $d^2 \Phi$ nos indica que la potencia radiante emitida/detectada es diferenciada respecto al ángulo sólido y respecto al área proyectada emisora/detectora. Por tanto la potencia radiante emitida/detectada por una superficie será:

$$\Phi = \int_A \int_{\Omega} L \cos \theta \, dA d\omega \quad [2.18]$$

Donde integramos a todo el área de la superficie emisora (E) o detectora (D) y a la hemiesfera que comprendería todos los posibles ángulos sólidos emisores o detectores de radiación. Integrando sólo respecto al área de una fuente obtenemos su *intensidad* (función, en general del ángulo):

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} = \int_A L \cos \theta \, dA \quad [2.19]$$

Análogamente, integrando respecto a la hemiesfera de la superficie emisora obtenemos, su *exitancia* (función en general de la posición sobre la superficie):

$$M = \frac{d\Phi}{dA_E} = \int_{\Omega} L \cos \theta \, d\omega \quad [2.20]$$

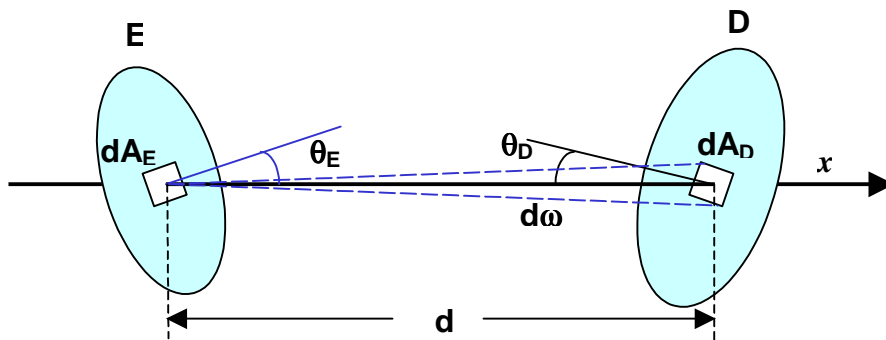


Figura 2.7 – Cálculo de la exitancia emitida-detectada.

Cuando la radiancia emitida por la fuente es independiente del ángulo θ_E para el cono en que es emitida la radiación (figura 2.7) (en este caso diremos que la radiancia es “isótropa dentro de un cono”) la exitancia es simplemente:

$$M = L \int \cos \theta d\omega = L \Omega \quad [2.21]$$

El valor de la integral de la expresión [2.21] es Ω , el ángulo sólido proyectado en el que la fuente emite. Cuando la fuente emite en un cono normal a la superficie, siendo su semiángulo Θ , el ángulo sólido proyectado Ω es fácilmente calculable [Wyatt 91] [Dereniak 96]:

$$\Omega = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\Theta \cos \theta \sin \theta d\theta = \pi \sin^2 \Theta \quad [2.22]$$

El máximo valor posible para el ángulo sólido proyectado es π , que se da cuando la fuente emite en todas las direcciones, es decir, cuando θ varía entre 0 y $\pi/2$. Una fuente en la que la radiancia emitida es independiente del ángulo de emisión y que además emite en todas las direcciones se denomina *lambertiana* (se puede demostrar que la emisión de un cuerpo negro es lambertiana). En este caso obtenemos la siguiente relación entre la exitancia y la radiancia:

$$M = L \pi \quad [2.23]$$

Todas las ecuaciones planteadas para la radiación emitida son válidas para la radiación detectada utilizando lógicamente la irradiancia E en lugar de la exitancia M . La irradiancia sobre el detector viene dada por la siguiente expresión:

$$E = \frac{d\Phi}{dA_D} = \int_{\Omega} L \cos \theta d\omega \quad [2.24]$$

Un caso particular de gran importancia es el de fuente homogénea e isótropa en un cono (por ejemplo una fuente lambertiana homogénea), cuando el detector y la fuente se encuentran en medios de igual índice de refracción. En este caso, todos los rayos emitidos tienen igual radiancia y la propiedad de la invariancia de la radiancia nos asegura que esa radiancia será la misma que llegue al detector, quedando la expresión [2.24]:

$$E = L_E \Omega_D \quad [2.25]$$

Siendo L_E , la radiancia emitida y Ω_D , el ángulo sólido proyectado definido por la radiación incidente sobre el detector. Pero si la radiancia de la fuente es independiente del ángulo, tendremos que $L_E = M_E / \Omega_E$ siendo M_E la exitancia y Ω_E el ángulo sólido

proyectado definido por la radiación emitida sobre la superficie emisora. Por tanto, la irradiancia detectada cuando la fuente es homogénea e isotrópica en un cono será:

$$E = M_E \frac{\Omega_D}{\Omega_E} \quad [2.26]$$

Donde M_E y Ω_E son constantes para todos los puntos de la fuente, pero Ω_D puede variar de un punto a otro de la superficie detectora.

Sistemas que forman imagen

Dado que los sistemas que utilizaremos en este trabajo serán cámaras IR, nos interesan especialmente los cálculos radiométricos para sistemas ópticos que forman imágenes. Los parámetros fundamentales que caracterizarán un sistema óptico simple formado por una lente son los siguientes [Dereniak 96] [Hudson 69]:

- La *distancia focal efectiva del sistema*, f . – Se define como la distancia desde el centro de la lente al punto, denominado *foco*, donde convergen los rayos que entran paralelos al eje óptico del sistema.
- La *pupila de entrada*. – Es la superficie del sistema óptico que limita los rayos procedentes de un punto del eje óptico del espacio objeto que penetran en el sistema. Está caracterizada por su diámetro, D_{pe} .
- El *número F*, $F/\#$. – Determina la cantidad de flujo radiante que entra en el sistema y se define como el cociente entre la focal del sistema, f , y el diámetro de la pupila de entrada al sistema D_{pe} ,

$$F/\# = \frac{f}{D_{pe}} \quad [2.27]$$

Cuanto menor es el número F , mayor cantidad de radiación entra en el sistema, por lo que también se suele utilizar otra magnitud, la *apertura numérica*, AN , definida como la inversa del doble del número F ,

$$AN = \frac{1}{2(F/\#)} \quad [2.28]$$

- El *campo de visión instantáneo*, IFOV (*Instantaneous Field Of View*). – Es el ángulo subtendido por cada detector del sistema y viene dado (en radianes) por,

$$IFOV = \frac{t}{f} \quad [2.29]$$

siendo t el tamaño lineal del detector supuesto cuadrado.

- El *campo de visión*, FOV (*Field Of View*) del sistema. – Es naturalmente,

$$\text{FOV} = n \cdot \text{IFOV} \quad [2.30]$$

donde n es el número de detectores en cada dimensión para un *array*.

Calcularemos aquí la irradiancia sobre el detector para el caso de una fuente homogénea lambertiana. Esto implica que $\Omega_E = \pi$, y para calcular la irradiancia sobre el detector E_D , debemos determinar Ω_D . La geometría del problema se puede apreciar en la figura 2.8, suponiendo que la focal del sistema es f , y que el sistema enfoca perfectamente la fuente, es decir, el detector se encuentra situado en el plano imagen de la fuente. Para aproximación paraxial, es decir, ángulos pequeños y puntos cercanos al eje óptico se obtiene que

$$\Omega_D \approx \omega_D \approx \pi (D_{pe}/2)^2 / q^2 \quad [2.31]$$

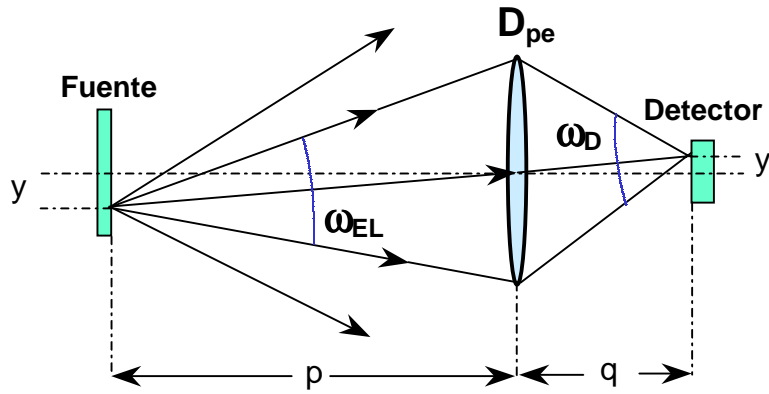


Figura 2.8 – Trazado de rayos para un sistema formador de imagen con un detector.

Donde q es la distancia imagen (considerada positiva a la derecha de la lente). Esta distancia q normalmente no la conoceremos, salvo para objetos en el infinito que será f . No obstante, podemos poner la expresión anterior en función de la distancia objeto p (considerada positiva a la izquierda de la lente). El ángulo sólido subtendido por la pupila de entrada vista desde un punto de la fuente, ω_{EL} , está relacionado con el ángulo ω_D a través del *aumento* m ($m = -q/p$ [Dereniak 96] [Hecht 77]) por la expresión,

$$\omega_D = \omega_{EL} / m^2 \quad [2.32]$$

sustituyendo,

$$\Omega_D \approx \omega_{EL} / m^2 \approx \pi (D_{pe}/2)^2 / p^2 m^2 \quad [2.33]$$

Rescribiendo la expresión, teniendo en cuenta la definición del número F , expresión [2.27], obtenemos,

$$\Omega_D = \pi f^2 / 4 (F/\#)^2 p^2 m^2 \quad [2.34]$$

Por lo tanto el valor para la irradiancia, teniendo en cuenta la expresión [2.26], será

$$E = M_E \frac{\Omega_D}{\Omega_E} = \frac{M_E f^2}{4(F/\#)^2 p^2 m^2} \quad [2.35]$$

Sustituyendo p en función de f y m ($p^2 = (f^2 \cdot (|m| + 1)^2 / m^2)$ [Hecht 77]) obtenemos finalmente,

$$E_D(x', y') = \frac{M_E(x, y)}{4(F/\#)^2 (|m| + 1)^2} \quad [2.36]$$

Donde (x', y') son las coordenadas del punto del detector correspondientes a las (x, y) de la fuente. Para el caso en el que la fuente está muy alejada, $p \rightarrow \infty \Rightarrow m \rightarrow 0$, luego la expresión [2.36] queda de la forma,

$$E_D(x', y') \rightarrow \frac{M_E(x, y)}{4(F/\#)^2} \quad [2.37]$$

Podemos concluir que el número F es el parámetro que determina la irradiancia de la imagen. Recordando que $F/\# = f/D_{pe}$, vemos que ésta es:

- Directamente proporcional al área de la pupila de entrada.
- Inversamente proporcional al cuadrado de la distancia focal.
- Independiente de la distancia objeto p , siempre que ésta sea lo suficientemente grande.

Para calcular la potencia total recogida por el detector, considerando que en el sistema óptico existe estigmatismo entre los puntos de la fuente y del detector, es decir, la fuente está enfocada y el detector se encuentra en el plano imagen de la fuente, deberemos distinguir dos casos en cuanto al tamaño de la fuente [Hudson 69]:

- Fuente “puntual”. – La imagen de la fuente es menor que el detector elemental, es decir, todos los puntos de la fuente están dentro del campo de visión del detector. Entonces $\Phi_D = E A_{img}$, siendo A_{img} el área de la imagen de la fuente: $A_{img} = A_S \cdot m^2$. Teniendo en cuenta la expresión [2.31], obtenemos que,

$$\Phi_D = \frac{M_E A_S f^2}{4(F/\#)^2 p^2} = \frac{M_E A_S D_{pe}^2}{4p^2} \quad [2.38]$$

Donde podemos observar que la potencia decrece con el cuadrado de la distancia y es proporcional al área de la pupila de entrada. Para un número F constante, si cambiamos a una lente de mayor focal la potencia recogida será mayor (porque el área de la imagen será mayor).

- Fuente “extensa”. – En este caso la imagen de la fuente es mayor que el detector. Ahora el área de la imagen será $A_{\text{img}} = A_D = \pi R_D^2$, utilizando las expresiones anteriores obtenemos,

$$\Phi_D = \frac{M_E \pi R_D^2}{4(F/\#)^2 (|m| + 1)^2} \quad [2.39]$$

Si hacemos tender la distancia de la fuente al sistema óptico al infinito, obtenemos que,

$$\Phi_D \rightarrow \frac{M_E \pi R_D^2}{4(F/\#)^2} \quad [2.40]$$

Donde se puede ver que la potencia recibida por un detector de una fuente situada en el infinito no depende de la distancia, si la imagen de dicha fuente es mayor que el detector. Esta es la situación que nos encontraremos cuando utilicemos fuentes situadas en el foco de un colimador, ya que el haz de radiación es paralelo y deberá focalizar en un punto [Holst 98].

2.3. Absorción y emisión de gases en el IR

La radiación que se va a detectar, como se dijo al inicio del capítulo, debe atravesar el medio que separa la fuente de la óptica. En teledetección, ese medio es la atmósfera. El flujo de radiación será atenuado por la atmósfera debido a procesos de *absorción* y de *dispersión* (o *scattering*) por moléculas de gas, agrupaciones moleculares (aerosoles), lluvia, nieve, y partículas en suspensión como humo, polvo, niebla y neblina [Lloyd 82].

La atenuación a que es sometido un haz de radiación que atraviesa la atmósfera se denomina en general proceso de *extinción*. Así la transmitancia de la atmósfera para un camino recorrido x , viene dado por la expresión,

$$\tau = \exp(-\sigma(\lambda)x) \quad [2.41]$$

donde σ es el *coeficiente de extinción* y x el camino recorrido por la radiación. El coeficiente de extinción puede escribirse de la forma,

$$\sigma(\lambda) = a(\lambda) + \gamma(\lambda) \quad [2.42]$$

donde $a(\lambda)$, es el *coeficiente de absorción* y es el que da cuenta de la absorción de los gases atmosféricos, y $\gamma(\lambda)$ es el *coeficiente de scattering* y tiene en cuenta el *scattering*

producido por las moléculas de los gases, niebla, bruma etc. Ambos varían con la longitud de onda [Hudson 69]. Salvo en ambientes con gran densidad de partículas, en la región IR del espectro la principal causa de atenuación es la absorción.

2.3.1. Principios básicos

Como ya se mencionó, el espectro de emisión puede ser muy diferente dependiendo del tipo de cuerpo que se trate (figura 2.4). Para que la radiación interaccione con la materia, la energía de los fotones debe coincidir con la diferencia de energía entre dos niveles cuánticos de la sustancia. Por esta razón, los sólidos, con niveles sumamente próximos, tienen espectros continuos, mientras que los gases presentan espectros formados por líneas discretas. No obstante, en todos los casos las longitudes de onda de las líneas de emisión son las mismas que las de absorción.

En el caso de los gases, los espectros de absorción-emisión observados en el IR son debidos a interacciones radiación-materia a nivel molecular. Estos espectros muestran ciertas bandas, que si son observadas con la suficiente resolución, revelan la existencia de múltiples líneas muy estrechas, que constituyen la denominada *estructura fina* del gas. Un ejemplo es el espectro del monóxido de carbono CO (figura 2.9).

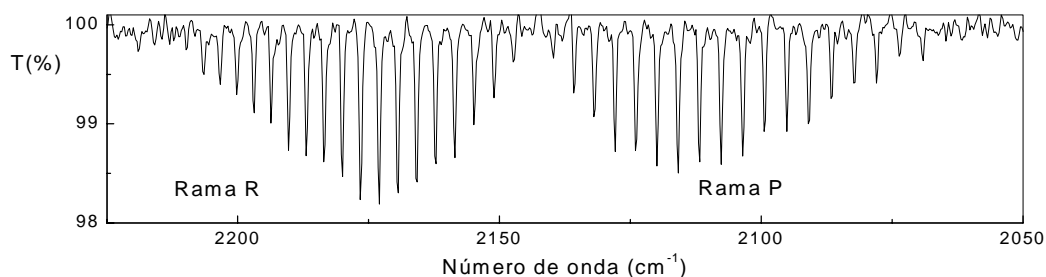


Figura 2.9 – Espectro de absorción de CO, obtenido por espectrofotometría FTIR para una concentración de 300 ppm, un camino óptico de 0.1 m y con una resolución de 0.5 cm^{-1} [Meneses 99].

En una molécula pueden distinguirse niveles de energía de tipo electrónico, traslacional, rotacional y vibracional. El espectro de absorción infrarroja se obtiene porque la radiación de esta zona del espectro produce transiciones entre los niveles energéticos vibro-rotacionales, debido a los cambios en el momento dipolar de la molécula. Por esta razón, los gases homonucleares como O_2 , N_2 y Ar, al no presentar momento dipolar, no tienen espectro vibracional de energías y no son detectables en el IR.

Lejos de ser un inconveniente, es una gran ventaja, ya que son los constituyentes principales de la atmósfera, haciendo que esta sea muy transparente a la radiación IR, como veremos en el siguiente apartado. Por otra parte, los principales gases de interés medioambiental (figura 2.10) como CO₂, CO, SO₂, NO_x, O₃, CH₄, CFC-12, presentan bandas de emisión-absorción IR al ser gases heteronucleares y presentar un momento dipolar. A estos gases hay que añadir el H₂O que tiene un complicado espectro de líneas de emisión-absorción en todo el rango IR, presenta además un *continuo de emisión-absorción* en todas las longitudes de onda.

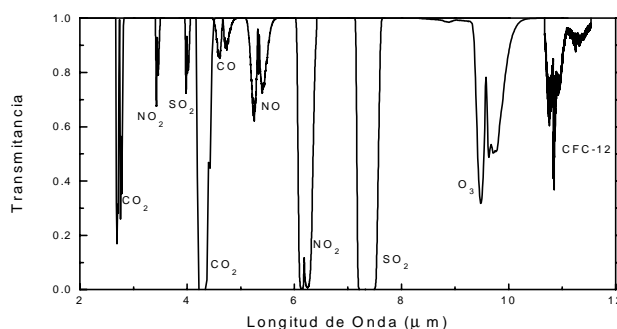


Figura 2.10 – Bandas de absorción en el IR de gases de interés medioambiental [Briz 01].

Cada gas tiene un espectro específico en el IR, constituyendo su “huella espectral”, que sirve para identificarle y distinguirlo de cualquier otro ya que sus niveles energéticos vibracionales son únicos y por tanto su espectro IR también.

Ley de Lambert-Beer

La expresión cuantitativa de la absorción de radiación en un medio viene dada por la ley de Lambert-Beer, que relaciona la cantidad de radiación absorbida con la concentración del gas absorbente, C , y el camino óptico recorrido. Si sobre una muestra de espesor l incide un haz de radiación monocromática de intensidad I_0 , la intensidad a la salida I , vendrá dada por la expresión,

$$I = I_0 \exp(-a(\lambda) C l) \quad [2.43]$$

siendo $a(\lambda)$ la absorptividad, función de la longitud de onda y con dimensiones de área, y que está relacionada con la probabilidad de transición entre los niveles, siendo cero fuera de las bandas de absorción del gas en cuestión. La relación entre la intensidad transmitida y la incidente será la transmitancia espectral, $\tau(\lambda)$, de la muestra,

$$\tau(\lambda) = \frac{I}{I_0} \quad [2.44]$$

2.3.2. Transmisión atmosférica

Como se ha visto, no todos los gases que componen la atmósfera absorben en el IR. En la tabla 2.2 se muestran los gases que componen la atmósfera seca, denominados *constituyentes permanentes* debido a que sus proporciones son constantes hasta unos 80 km de altura, indicando si absorben o no en el rango de interés del IR para nuestro trabajo [Hudson 69][Smith 93].

Gas	Formula química	Porcentaje en volumen	Absorción entre 2 – 15 μm
Nitrógeno	N ₂	78.084	No
Oxígeno	O ₂	20.946	No
Argón	Ar	0.934	No
Dióxido de carbono	CO ₂	0.032	4.26 μm
Neón	Ne	$1.818 \cdot 10^{-3}$	No
Helio	He	$5.24 \cdot 10^{-4}$	No
Metano	CH ₄	$2.0 \cdot 10^{-4}$	3.31 μm
Kriptón	Kr	$1.14 \cdot 10^{-4}$	No
Monóxido de nitrógeno	N ₂ O	$5.0 \cdot 10^{-5}$	4.50 μm
Hidrógeno	H ₂	$5.0 \cdot 10^{-5}$	No
Xenón	Xe	$9.0 \cdot 10^{-6}$	No

Tabla 2.2 – Composición de la atmósfera seca (adaptada de [Hudson 69][Smith 93]).

La atmósfera contiene otros gases denominados *constituyentes variables*, cuya cantidad varía con la temperatura, altitud y localización. Así, por ejemplo, uno de los principales absorbentes de radiación IR a nivel del mar, como es el vapor de agua (figura 2.11), decrece muy rápidamente con la altitud y a 12 km su cantidad es prácticamente despreciable. En cualquier medida en el IR es importante determinar cual es la cantidad de vapor de agua existente en el ambiente para poder calcular la transmitancia atmosférica. Por el contrario, el ozono, que también absorbe en el IR (figura 2.11) incrementa su porcentaje en la atmósfera con la altitud, pasando por un máximo en torno a 22 km, volviendo a decrecer en altitudes superiores.

En la figura 2.11 [Hudson 69] se muestra la transmitancia de la atmósfera medida para una distancia de 2 km, indicándose en la parte superior de la figura la molécula del gas responsable de la absorción en cada banda.

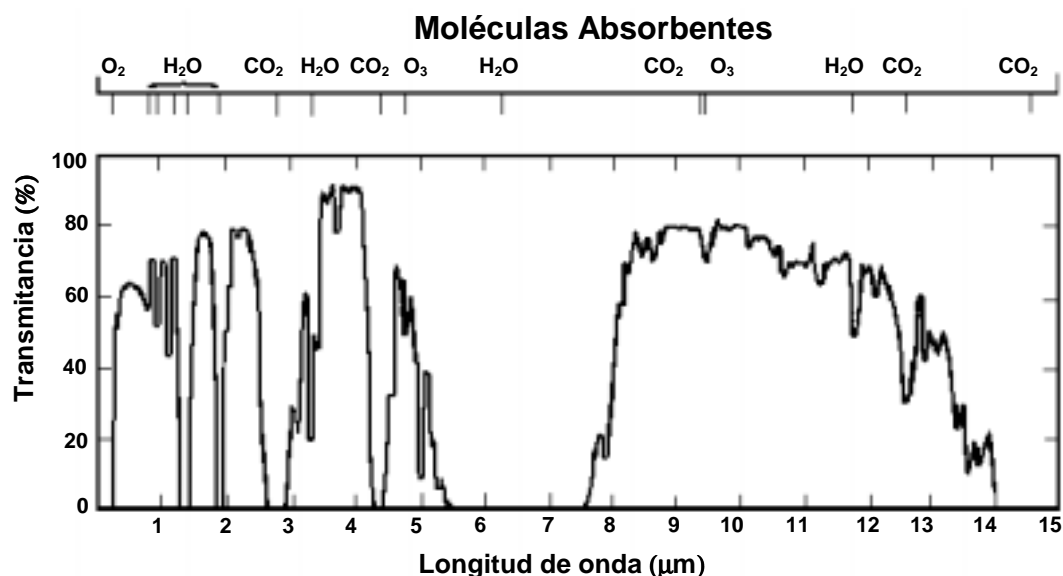


Figura 2.11 - Transmitancia atmosférica medida para una distancia de 2 km al nivel del mar (adaptada de [Hudson 69]).

Se observa claramente la existencia de varias regiones de elevada transmitancia, conocidas como *ventanas atmosféricas*. Estas ventanas atmosféricas delimitan las subdivisiones del espectro IR. Se puede apreciar que la transmitancia en el infrarrojo medio (MIR de 3 a 5 μm) y el térmico (TIR de 8 a 12 μm) es superior incluso a la de la zona visible. No obstante, se debe destacar la fuerte banda de absorción del CO_2 atmosférico en 4.26 μm en la banda MIR. Esta banda produce una importante atenuación pero a la vez resulta de gran interés ya que será precisamente la adecuada para estudiar fenómenos donde se produce emisión de CO_2 . Un ejemplo que será estudiado con detenimiento en los siguientes capítulos es el caso de las llamas o, en general, de las combustiones, donde uno de los principales productos es CO_2 .

Existen varias aplicaciones informáticas que permiten determinar la transmitancia de la atmósfera en diferentes condiciones y para diferentes caminos ópticos utilizando modelos de atmósfera [Holst 95]. Estos programas se basan en las líneas o bandas espectrales de los gases constituyentes y en el *scattering* producido por las partículas en suspensión, generalmente aerosoles. Históricamente el primer programa de este tipo fue el LOWTRAN (*LOW spectral resolution TRANsmision*), desarrollado en 1971 por el *Phillips Laboratory* de las Fuerzas Aéreas estadounidenses [Smith 93]. Este programa se sigue actualizando constantemente y cubre espectralmente el rango desde 0.25 – 28.5 μm con una resolución de 20 cm^{-1} . Simula la atmósfera en 32

capas para cubrir desde el nivel del mar hasta una altura de 100 km. Se ha comprobado que este modelo es bastante preciso para la zonas bajas de la atmósfera cuando éstas son bastante homogéneas, y para un rango hasta unos 20 km. Para distancias mayores, es preciso utilizar el programa MODTRAN (*MODerate spectral resolution TRANsmision*) válido hasta unos 60 km [Smith 93]. La mayor resolución la proporciona el programa HITRAN (*HIGH spectral resolution TRANsmision*) que utiliza un modelo de líneas en lugar de bandas para simular la absorción-emisión de los constituyentes atmosféricos [Thomas M.E. 93].

2.4. El sistema sensor: cámaras infrarrojas

Dentro del sistema electro-óptico para la teledetección definido al comienzo del capítulo, el siguiente elemento por estudiar es el sistema sensor, con todos los elementos que lo componen: la óptica, el detector, la electrónica de lectura y acondicionamiento de la señal y la salida de la señal.

En esta sección se pretende dar una visión general sobre los elementos que componen un *sistema de imagen IR*. En la sección 2.5 se examinarán las características básicas de los *espectrómetros de imagen*. En ambas secciones nos referiremos a sistemas genéricos. Los equipos utilizados en nuestro trabajo se explican más en detalle en los capítulos siguientes.

La figura 2.12 muestra los diferentes subsistemas que generalmente constituyen un sistema de imagen IR [Holst 95]. En línea punteada se indican los elementos que no son necesarios en algunos de estos sistemas, como se verá más adelante.

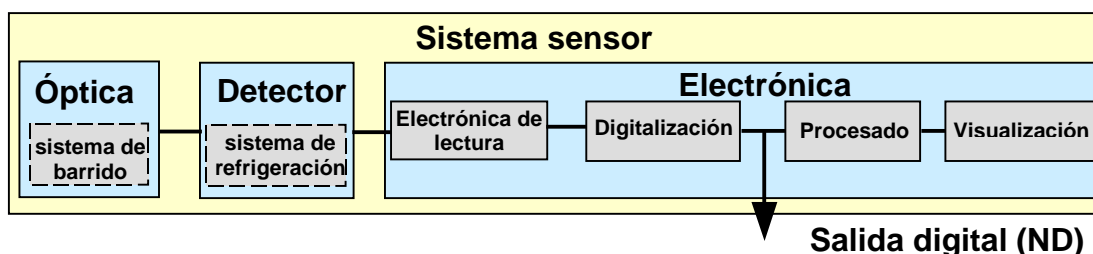


Figura 2.12 – Diagrama de bloques genérico de un sistema de imagen IR.

2.4.1. Óptica y sistema de barrido

La óptica de una cámara IR puede ser una simple lente, un sistema compuesto por varias lentes, o un sistema mucho más complejo en el que intervienen lentes y espejos [Riedl 95][Wolfe 99].

La primera etapa de la óptica es la encargada de recoger la radiación IR y estará compuesta en general por una o varias lentes. La necesidad de utilizar un sistema más complejo para la formación de imágenes viene impuesta por el tipo de detector. Si el sistema está dotado de un *monodetector*, para barrer toda la escena necesitaremos realizar un barrido vertical y otro horizontal. Estos barridos se realizan mediante espejos individuales capaces de girar o prismas rotatorios cuyas caras son espejos (figura 2.13). Si el detector es un *array lineal*, al menos necesitaremos realizar un barrido en una de las dos direcciones, horizontal o vertical. Por el contrario si el detector es un *array bidimensional* de detectores, la cámara tendrá una óptica relativamente sencilla y no necesitará partes móviles para formar imagen. Esta última tecnología se conoce con el nombre de *array de plano focal* (FPA), y el *array* bidimensional de detectores se sitúa en el plano focal de la óptica.

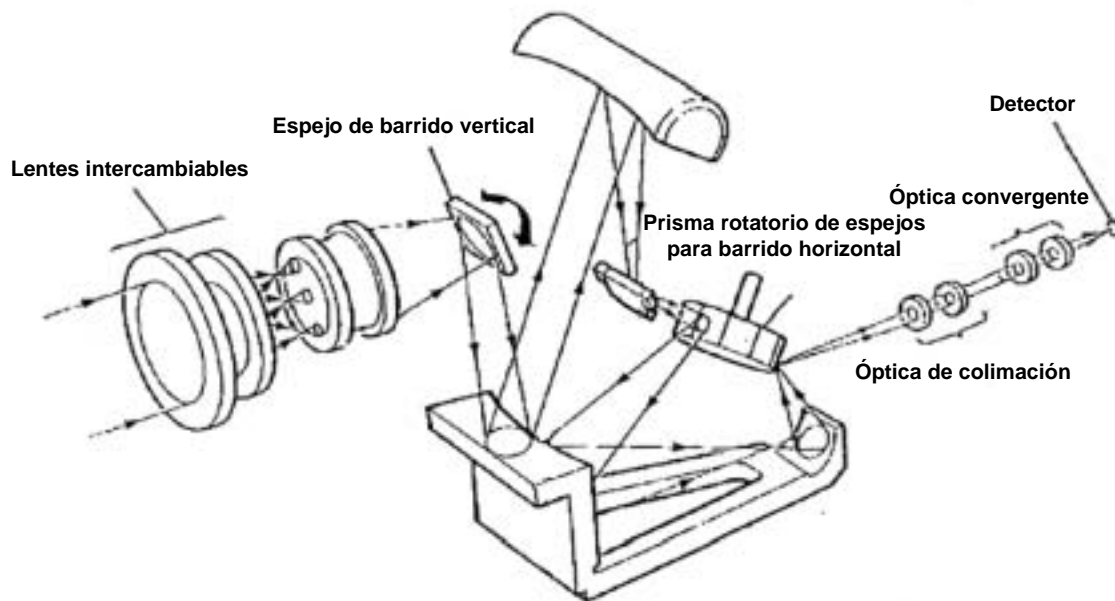


Figura 2.13 – Óptica utilizada para la formación de imágenes en una cámara IR con un monodetector (adaptada de [Hamrelius 91][Fraedrich 91]).

Los *materiales* utilizados para construir óptica IR varían dependiendo de la ventana atmosférica en la que se vaya a trabajar. Para mejorar la transmisión de la óptica se suelen utilizar tratamientos multicapa antirreflejantes. Estos tratamientos

multicapa también se utilizan como filtro interferencial paso-banda, para restringir la banda espectral de trabajo de la cámara en su conjunto, ya que bien la óptica, el detector, o ambos pueden trabajar en un rango espectral más amplio de los comúnmente utilizados (generalmente de 3 – 5 μm en la ventana del infrarrojo medio y de 8 – 12 μm en el térmico).

Aunque el subsistema óptico puede ser bastante complicado, sus prestaciones básicas pueden describirse siempre sólo con dos parámetros: el número F ($F/\#$) y el campo de visión (FOV) (apartado 2.2.5).

Para maximizar la sensibilidad radiométrica, conviene reducir el $F/\#$, pues así aumenta la irradiancia que incide sobre el detector (expresión [2.37]). Esto puede lograrse aumentando el tamaño de la pupila de entrada o disminuyendo la distancia focal. La primera solución obliga a usar lentes de gran diámetro, generalmente muy caras; la segunda aumenta el campo de visión y lleva por tanto a una pérdida de resolución espacial, provocando además aberraciones, al alejarse el sistema de la condición paraxial. Así pues, se debe llegar a un compromiso entre los valores de estos parámetros, que será distinto dependiendo de la aplicación para la que se vaya a utilizar el sistema.

2.4.2. Detectores utilizados en cámaras IR

El detector es el elemento central de una cámara IR y en función de sus características se diseñarán los demás elementos del sistema: óptica, sistema de barrido si es necesario, refrigeración y electrónica de lectura y acondicionamiento de señal.

Básicamente se pueden distinguir dos clases de detectores atendiendo al mecanismo físico de detección empleado: los *detectores térmicos* y los *detectores cuánticos*. El mecanismo de detección empleado por los detectores térmicos se basa en el cambio de alguna de sus propiedades en función del calentamiento producido por la radiación incidente. Por el contrario, en los detectores cuánticos existe una interacción directa entre los fotones de la radiación IR incidente y los electrones del material del detector. Por tanto la respuesta de un detector térmico está relacionada con la cantidad de energía absorbida, mientras que en los detectores cuánticos es función del número de fotones absorbidos. Los detectores térmicos han sido utilizados desde Herschel, mientras que los primeros detectores cuánticos (sulfuro de talio) se desarrollaron en Alemania durante la segunda guerra mundial.

Caracterización de detectores

Para dar una medida cuantitativa de la calidad de un detector se definen una serie de parámetros, denominados *figuras de mérito*, que se enumeran a continuación [Vincent 90].

- *Responsividad*, $\mathfrak{R}(\lambda)$. – Es el cociente entre la señal eléctrica de salida (habitualmente medida en voltios) y la señal IR incidente, medida como flujo radiante (vatios). Generalmente, la responsividad es una función espectral,

$$\mathfrak{R}(\lambda) = \frac{\text{señal de salida}}{\text{señal de entrada}} = \frac{S}{E_D \cdot A_D} \quad [\text{V/W}] \quad [2.45]$$

- *Ruido*, N . – Es cualquier señal eléctrica distinta a la que se quiere detectar y que se suma a ella. Es inevitable, y por ello se debe mantener lo más bajo posible para que no afecte a la medida. Hay ruido *extrínseco*, debido a factores externos no controlados como interferencias eléctricas, fluctuaciones de la temperatura, etc, pero que con un buen diseño se pueden evitar. Por el contrario, el ruido *intrínseco* es debido a voltajes aleatorios que se generan en el propio proceso de detección y que por tanto no pueden ser eliminados. Éste es el ruido en sentido estricto.
- *Relación señal-ruido*, SNR (*Signal-to-Noise Ratio*). – Es la relación entre el voltaje de la señal y el voltaje del ruido, ambos medidos en valores rms. Lógicamente, cuanto mayor es este valor mejor será la medida.

$$\text{SNR} = \frac{S}{V_{\text{ruido}}} \quad [2.46]$$

- *Potencia equivalente de ruido*, NEP (*Noise Equivalent Power*). – Se define como la potencia IR que debe incidir sobre el detector para dar una relación señal-ruido igual a 1. Se considera que potencias más bajas no pueden detectarse, porque quedan enmascaradas por el ruido.

$$\text{NEP} = \frac{\text{ruido}}{\text{responsividad}} = \frac{V_{\text{ruido}}}{\mathfrak{R}} \quad [\text{W}] \quad [2.47]$$

- *Detectividad específica*, D^* . – Un inconveniente del NEP es su dependencia del área del detector y del ancho de banda con el que se ha realizado el test. La detectividad específica es la inversa del NEP, normalizada al área y al ancho de banda. Puede demostrarse que la normalización se obtiene de esta manera,

$$D^* = \frac{\text{responsividad} \cdot \sqrt{\text{área}}}{\text{ruido} / \sqrt{\Delta f}} = \frac{\Re \sqrt{A_D}}{V_{\text{ruido}} / \sqrt{\Delta f}} = \frac{S \sqrt{\Delta f}}{V_{\text{ruido}} E \sqrt{A_D}} \quad [\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}] \quad [2.48]$$

De la ecuación anterior resulta que la relación señal ruido es proporcional a D^* :

$$\text{SNR} = \frac{D^* E \sqrt{A_D}}{\sqrt{\Delta f}} \quad [2.49]$$

- *Rango dinámico.* – El rango dinámico del detector se define como el intervalo comprendido entre el umbral de detección y la máxima señal útil (mayor valor para el que el detector sigue siendo lineal).

Detectores térmicos

El mecanismo de detección de los detectores térmicos es el cambio de alguna de sus propiedades físicas debido al calentamiento producido por la radiación IR incidente. Generalmente no necesitan ser refrigerados, y su responsividad suele ser espectralmente plana (independiente de la longitud de onda incidente) (figura 2.14). Su tiempo de respuesta es largo, del orden de milisegundos, ya que necesitan tiempo para alcanzar el equilibrio térmico antes de dar una respuesta precisa.

Hay una gran variedad de detectores térmicos que se han utilizado para la detección de radiación IR [Gaussorgues 89][Vincent 90][Hudson 69][Holst 00]: *termopares*, basados en el efecto termoeléctrico, *termopilas*, que consisten en agrupaciones de termopares en serie; *detectores piroeléctricos*, cuyo mecanismo de detección consiste en la generación de cargas eléctricas superficiales debido a la dilatación que la radiación incidente produce en el material detector; *detectores neumáticos o de Golay*, en los que se utiliza la expansión de un gas contenido en una celda provocada por la radiación absorbida, etc. Sin embargo, los detectores térmicos más utilizados y los únicos que se usan en la actualidad en *arrays* para cámaras IR son los *bolómetros*.

Los bolómetros son detectores térmicos cuya resistencia eléctrica cambia en función del calentamiento debido a la radiación. Pueden realizarse en materiales muy diferentes, como metales, semiconductores y superconductores (en este caso tienen que estar refrigerados a temperaturas cercanas al cero absoluto). Los más habituales son los *termistores bolométricos*, realizados con mezclas de óxidos metálicos semiconductores. Estos bolómetros tienen una constante de tiempo más pequeña que los metálicos, son más robustos, no necesitan refrigeración y debido a su alta resistencia se acoplan muy bien a la electrónica de lectura [Hudson 69].

En la década de los 90 se comenzaron a fabricar *arrays* de este tipo de microbolómetros en VO_x [Meyer 91]. Este hecho representó una revolución en la realización de cámaras IR debido a dos importantes ventajas: no necesitar refrigeración y evitar las partes móviles del sistema de barrido, simplificando mucho el sistema y haciéndolo más robusto, silencioso y ligero. En este trabajo se ha utilizado una de estas cámaras de primera generación (ya se comercializan las de tercera generación), que será analizada más en detalle en los capítulos siguientes. Recientemente han aparecido también *arrays* de microbolómetros de Si amorfo utilizados para fabricar cámaras IR de pequeño tamaño [Schimert 00].

Otros microbolómetros utilizados en cámaras IR son los ferroeléctricos BST (Bario-eStroncio-Titanio). En principio sus prestaciones en cuanto a detectividad y calidad de imagen eran bastante inferiores a las cámaras de microbolómetros de semiconductores, al necesitar un *chopper* para su correcto funcionamiento. Pero desde finales de 2001 se comercializan cámaras con *arrays* de este tipo de detectores con prestaciones similares a las de VO_x , y con un coste bastante inferior a estas [website 4].

Detectores cuánticos

El mecanismo de detección empleado por los detectores cuánticos se basa en la interacción directa radiación-materia, es decir, entre los fotones incidentes y los electrones del detector. En consecuencia, el tiempo de respuesta en estos detectores es mucho menor que en los térmicos (del orden de microsegundos). El material del detector generalmente es un semiconductor, en el cual los fotones incidentes producen pares electrón-hueco. Estos portadores pueden utilizarse para la detección de dos maneras distintas:

- Cuando el detector es polarizado, estos portadores fotogenerados crean una fotocorriente, aumentando por tanto su conductividad con la iluminación. Este efecto se denomina *efecto fotoconductor*.
- Cuando un fotón incide en una unión *p-n*, generando un par electrón-hueco, la diferencia de potencial existente en la unión será capaz de separar ambos portadores generando un fotovoltaje. Este efecto se conoce como *fotovoltaje* y en este caso no es necesaria la polarización del detector para separar los portadores, siendo el tiempo de respuesta, además, más rápido.

En teoría, cualquier material que trabaje como fotoconductor también lo puede hacer como fotovoltaje.

La respuesta espectral en los detectores cuánticos, a diferencia de los térmicos, varía con la longitud de onda (figura 2.14) y en particular presentan una longitud de onda de corte por encima de la cual su detectividad cae a cero. Esto es debido a que la energía de los fotones debe superar un determinado umbral para conseguir generar un par electrón-hueco.

Los detectores cuánticos generalmente necesitan ser refrigerados a temperaturas criogénicas por diferentes razones. Como cualquier cuerpo con temperatura superior a 0 K es un emisor de radiación, los propios detectores radían en las longitudes de onda en las que son sensibles; además, la electrónica de lectura disipa calor que debe evacuarse. La refrigeración de los detectores también hace que su detectividad específica aumente (figura 2.14), que se reduzca el ruido intrínseco y que la longitud de onda de corte varíe.

Esta refrigeración de los detectores se consigue por diferentes métodos [Gaussorgues 89] [Hudson 69]:

- Utilización de gases licuados como N_2 (77 K) y He (4.2 K)
- Ciclos de refrigeración abiertos como el Joule-Thomson o cerrados como el Stirling, que permiten alcanzar hasta 77 K e incluso la temperatura del He líquido utilizando varios de estos sistemas en cascada.
- Refrigeración termoeléctrica, utilizada cuando no es necesario llegar a temperaturas tan bajas. Está basada en el efecto Peltier, alcanzándose temperaturas desde 243 K para una etapa y hasta 173 K utilizando seis etapas.

La detectividad de los detectores cuánticos es varios ordenes de magnitud superior a la de los térmicos, como se puede apreciar en la figura 2.14, donde se representa la detectividad específica en función de la longitud de onda para varios detectores IR. Se señala también la temperatura de operación a la que cada detector alcanza la D^* indicada. Pese al inconveniente de la refrigeración a bajas temperaturas, los detectores cuánticos son idóneos para la construcción de cámaras IR debido a su rapidez de respuesta y a su selectividad espectral.

El uso de *arrays* bidimensionales para la fabricación de cámaras IR con detectores cuánticos se ha generalizado en los últimos años. Existen dos tipos de *arrays* en cuanto a su estructura, los híbridos y los monolíticos. En estos últimos, la detección y la manipulación de las cargas generadas se realizan en el mismo material. Generalmente son fotodiodos de barrera Schottky de PtSi. Es importante señalar que la cantidad de elementos que componen los *arrays* varía notablemente (apartado 2.4.5) dependiendo

del material que se trate y también, en el caso del MCT (*Mercurium Cadmium Telluride*) de la banda espectral de trabajo (más complicado para la banda TIR que para la MIR) [Wolfe 96].

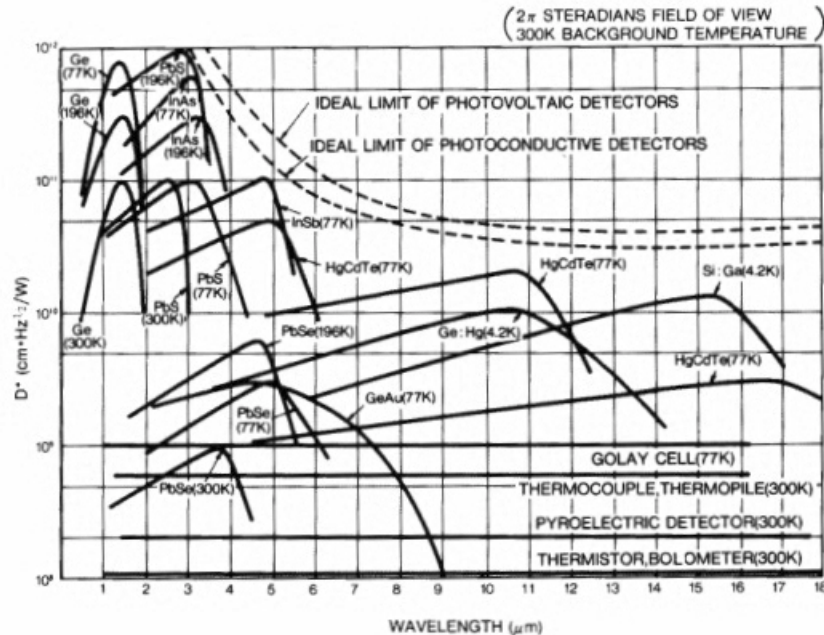


Figura 2.14. – Detectividad específica en función de la longitud de onda para varios detectores IR para la temperatura indicada (adaptada de [Hudson 69][Papini 94]).

2.4.3. Electrónica de lectura y acondicionamiento de señal

La electrónica de lectura recibe la señal eléctrica de bajo nivel del detector, amplificándola y limitando su ancho de banda. Posteriormente la electrónica de acondicionamiento de señal extrae la información y la adecúa para presentarla en un sistema de visualización. Los parámetros que más nos interesan de la electrónica del sistema son las salidas de datos de que dispone y el rango dinámico del conversor analógico-digital (AD) que utiliza, ya que de él dependerá en gran parte la resolución radiométrica del sistema. Los sistemas de acondicionamiento de señal y generación de vídeo compuesto utilizan un control de ganancia automática (AGC) para acomodar la señal de salida del conversor AD utilizado al rango dinámico de los dispositivos de visualización, además se realizan correcciones, en función de la escena, para mejorar el contraste de la imagen de vídeo compuesto. Por este motivo, la señal de vídeo no suele ser la adecuada para realizar medidas radiométricas, ya que se opta por mejorar la visualización de la escena a costa de perder información radiométrica. Para este trabajo, como se verá en el capítulo 3, ha sido necesario acceder a la señal digital del sistema.

Esta señal es la procedente de cada detector una vez ajustadas la ganancia y el *offset* o nivel de cero para cada uno de ellos, con el fin de uniformizar su respuesta (ver apartados 3.2.1 y 3.2.2).

No todos los sistemas IR comerciales tienen acceso a esta señal y no todos utilizan los mismos protocolos de transferencia de datos.

2.4.4. Figuras de mérito de un sistema de imagen IR

Anteriormente hemos visto las figuras de mérito para detectores, pero en un sistema más complejo como un sistema de imagen IR, es necesario definir nuevas magnitudes específicas para caracterizar sus prestaciones, en las que no sólo influyen las características del detector, sino también las de los subsistemas óptico y electrónico.

Un sistema de imagen IR se empleará para la teledetección de fenómenos térmicos o que produzcan contraste radiativo en esta banda espectral. Las magnitudes que caracterizarán las prestaciones del sistema, y por tanto la calidad de la imagen, estarán relacionadas con su *resolución espacial*, su *resolución radiométrica* y su *respuesta espectral* [Gaussorgues 89] [Holst 00].

El valor de las magnitudes que a continuación se describen, se especificará en los siguientes capítulos para los equipos utilizados.

Irradiancia equivalente al ruido NEI (*Noise Equivalent Irradiance*)

Es la irradiancia necesaria en la pupila de entrada para que se produzca una señal eléctrica igual al ruido del sistema; es decir, es la irradiancia mínima detectable.

Resolución espacial

Indica cual es el más pequeño detalle que puede ser percibido, y se define por el ángulo que limita la separación de ese detalle. No incluye los efectos del ruido del sistema ni está relacionada con la resolución térmica. Puede ser especificada por una variedad de parámetros, a menudo no relacionados, como el diámetro del disco de Airy, el IFOV o la frecuencia de Nyquist.

Disco de Airy

La medida más extendida de la resolución óptica de un sistema es el tamaño del disco de Airy, es decir, el tamaño del disco central del patrón de difracción producido por un sistema óptico ideal, que expresado por un ángulo (en mrad) queda:

$$\theta_{\text{Airy}} = 2.44 \frac{\lambda_{\text{promedio}}}{D_{\text{pe}}} \quad [2.50]$$

donde $\lambda_{\text{promedio}}$, es la longitud de onda promedio de la banda espectral de trabajo (en μm) y D_{pe} , el diámetro de la pupila de entrada (en mm) [Holst 00].

El tamaño del mínimo objeto resoluble a una distancia p y para una longitud de onda dada λ , sería:

$$\text{Tamaño objeto} = \theta_{\text{Airy}} \cdot p = \left(\frac{2.44\lambda}{D_{\text{pe}}} \right) p \quad [2.51]$$

Campo de visión instantáneo IFOV

El IFOV es el ángulo sobre el cual el detector recibe radiación y cuya expresión vimos para un detector cuadrado de lado t [2.29], por tanto el tamaño del mínimo objeto resoluble en función de este ángulo será:

$$\text{Tamaño objeto} = \theta_{\text{IFOV}} \cdot p = \frac{t}{f} \cdot p \quad [2.52]$$

La resolución espacial del sistema será la composición de las dos anteriormente vistas y vendrá dada por la expresión:

$$\theta_{\text{Compuesta}} = \sqrt{\theta_{\text{Airy}}^2 + \theta_{\text{IFOV}}^2} \quad [2.53]$$

La transición desde la región donde el límite de resolución espacial queda fijado por el detector (IFOV) a la región donde queda fijado por la óptica (disco de Airy) es gradual, como se muestra en la figura 2.15 donde se representa la resolución compuesta relativa ($\theta_{\text{Compuesta}}/\theta_{\text{IFOV}}$) en función de $(F/\#)/t$, para un sistema de imagen en el infrarrojo térmico, considerando la longitud de onda promedio $10 \mu\text{m}$.

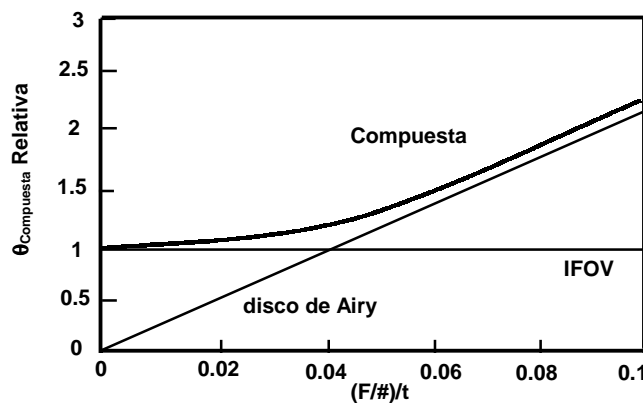


Figura 2.15. – Resolución compuesta relativa para un sistema de imagen IR en el infrarrojo térmico en función de $(F/\#)/t$ (t expresado en μm) y para una $\lambda_{\text{promedio}} = 10 \mu\text{m}$ (figura adaptada de [Holst 00]).

Frecuencia de Nyquist

Debido a los efectos del muestreo, la mayor frecuencia espacial que puede ser reproducida fielmente está limitada por la frecuencia de Nyquist. La localización discreta de los detectores en un *array* actúa como malla de muestreo y cuya frecuencia de muestreo f_s , viene dada por la expresión:

$$f_s = \frac{f}{d_{cc}} \quad [2.53]$$

donde f es la distancia focal y d_{cc} es la distancia entre centros de detectores o *pixel pitch*.

La frecuencia de Nyquist es precisamente la mitad de la frecuencia de muestreo:

$$f_N = \frac{f_s}{2} = \frac{f}{2 \cdot d_{cc}} \quad [2.54]$$

(Esta frecuencia limitará la frecuencia de la mira para realizar las medidas de MRTD en laboratorio). EL ángulo asociado con la frecuencia de Nyquist será,

$$\theta_{Nyquist} = \frac{1}{f_N} = \frac{2 \cdot d_{cc}}{f} \quad [2.55]$$

Función de transferencia de modulación (Modulation Transfer Function, MTF)

Las prestaciones en cuanto a resolución espacial de un sistema electro-óptico se suelen definir mediante la función de transferencia de modulación, MTF [Wolfe 96]. Esta función es una composición de las funciones de transferencia de todo el sistema y por tanto, engloba las correspondientes a la óptica, detector, electrónica, sistema de visualización e incluso el ojo del observador [Gaussorgues 89]. La MTF nos indica el número de ciclos por miliradián (ciclos/mrad) que se pueden distinguir perfectamente con el sistema. Para realizar la medida de la MTF de un sistema de imagen IR se sitúa una *mira de 4 barras* o *mira de Foucault* sobre un fondo a una temperatura diferente a la de ésta, de forma que el sistema trabaje en la zona lineal. La frecuencia de la mira se va aumentando hasta que es imposible la distinción de sus barras (es necesario señalar que esta medida no es objetiva y depende de la capacidad visual y aprendizaje del observador) [Wolfe 96] [Gaussorgues 89].

Resolución radiométrica

Se refiere a la mínima diferencia de temperatura detectable. Depende de la óptica, de la responsividad del detector y del ruido del sistema. Una medida de la resolución térmica es la *diferencia de temperatura equivalente al ruido*, NETD o NEΔT (*Noise Equivalent*

Temperature Difference), definida por la diferencia de temperatura aparente entre una fuente extensa y sus alrededores que produce una señal igual al ruido del sistema.

No obstante, las prestaciones globales del sistema dependen tanto de la resolución espacial como de la térmica. Por ello, y sobre todo orientadas a aplicaciones militares, se suelen utilizar dos figuras de mérito que ligan ambas resoluciones como son:

- La *mínima diferencia de temperatura detectable*, MDTD o MDT (*Minimum Detectable Temperature Difference*). – Es la mínima diferencia de temperatura aparente entre una fuente extensa y sus alrededores que hace que la fuente sea perceptible visualmente.
- La *mínima diferencia de temperatura resoluble*, MRTD o MRT (*Minimum Resolvable Temperature Difference*). – Es la mínima diferencia de temperatura aparente entre las barras de una mira de Foucault (o mira de 4 barras) y el fondo, que permiten separar visualmente las diferentes zonas de la mira. Lógicamente dependerá de la frecuencia de la mira utilizada, que estará limitada a su vez por la resolución espacial del sistema y por el observador, y también de la diferencia de temperatura entre el fondo y la mira, que deberá ser la más débil posible.

La MRTD nos indica el rango para el cual un blanco puede ser detectado, reconocido o identificado y se utiliza para predecir las prestaciones de los sistemas de vigilancia. Es una medida de la capacidad de resolver una mira de 4 barras sobre un fondo dado, mientras que la MDTD es una medida de la capacidad de detectar algo. Estas dos figuras de mérito no son valores absolutos, si no medidas de las diferencias de temperaturas perceptibles frente a un fondo dado. La MRTD tiene la misma dependencia de la temperatura del fondo que la NETD, al aumentar la temperatura del fondo la MRTD disminuye, por esta razón los valores de estas magnitudes se indican especificando la temperatura de fondo a la que fueron realizadas.

Es necesario apuntar que la MRTD se ha convertido en la medida estándar de la calidad de la imagen, ya que liga la NETD y la MTF del sistema, mientras que la MDTD no se suele usar [Holst 00].

Respuesta espectral

La respuesta espectral nos indica cual es la banda del espectro electromagnético en la que es operativo el sistema en su conjunto. Depende del detector, la óptica y del filtrado

óptico utilizado. La resolución espectral queda definida por la anchura de la banda de trabajo; como veremos más adelante, este parámetro es muy importante para sistemas de espectrometría de imagen.

2.4.5. Estado del arte de los sistemas de imagen IR

La evolución de los sistemas de imagen IR ha sido paralela al desarrollo de la tecnología en los campos involucrados en su diseño y fabricación: detectores, óptica, electrónica, sistemas de visualización e incluso microprocesadores. El impulso y financiación necesarios para este desarrollo ha venido del ámbito militar, debido a la gran cantidad de aplicaciones que tiene el IR en este campo. Esto ha significado que esta tecnología haya estado “clasificada” durante décadas.

El primer sistema de imagen IR fue un *scanner lineal*, dotado de un solo detector, realizado por las Fuerzas Aéreas norteamericanas (esta tecnología se denominó *strip mapper*). Este sensor era embarcado en un avión mirando hacia abajo, de modo que para formar la imagen se aprovechaba el movimiento en la dirección del avión para obtener una línea y posteriormente se construía la imagen con las franjas de terreno adquiridas en las sucesivas pasadas. En 1956, la Universidad de Chicago con el apoyo de las Fuerza Aéreas modificó este sistema incluyendo un barrido en la dirección perpendicular al movimiento del avión, obteniendo de esta forma una imagen de dos dimensiones mediante una sola pasada del avión, fue el primer sistema operativo.

El primer sistema en tiempo real en el infrarrojo térmico para su uso en tierra fue realizado en 1960 por *Perkin-Elmer* para la marina norteamericana. Este sistema aprovechó la aparición de detectores de corto tiempo de respuesta y estaba formado por un monodetector de InSb y dos prismas giratorios para realizar el barrido necesario para la formación de la imagen. Cabe destacar de sus características el IFOV de 1 mrad, un tiempo de formación de imágenes de 0.2 imágenes por segundo que mostraba en un monitor de fósforo y una sensibilidad térmica entorno a 1 °C.

El desarrollo de los sistemas embarcados (para uso en una plataforma móvil) fue retomado a principios de los 60, con *Texas Instruments* y *Hughes Aircraft* financiadas por las Fuerzas Aéreas y la Marina norteamericana respectivamente. Diseñaron en proyectos independientes sistemas embarcables que podían realizar el barrido en las dos direcciones mediante dos espejos móviles, denominados *Forward Looking Infrared*, FLIR (este acrónimo se ha utilizado durante tiempo aunque los sistemas fueran

totalmente diferentes al inicial). Estos prototipos fueron completados y probados en vuelo con éxito en 1965 [Lloyd 82][Holst 00].

Éste fue el punto de partida del actual diseño modular de sistemas. En los sistemas iniciales la imagen sólo podía verla una persona. En 1975 el multiplexado electro-óptico (EOMUX) permitió visualizar la imagen en un monitor. En la década de los 80, el multiplexado electrónico (EMUX) permitió mejorar la fiabilidad y corregir algunos defectos de la imagen. Se pusieron de manifiesto entonces las numerosas ventajas del uso de FPA frente a los sistemas de barrido. En la década de los 70 la tecnología existente limitaba el desarrollo de los FPA. Este hecho provocó la aparición de una nueva tecnología que se puede considerar el puente entre los *arrays* lineales y los FPA conocida como *time-delay-and-integrate*, TDI, que mejoraba la relación señal-ruido aunque seguía necesitando barrido para la formación de la imagen. En este campo, es necesario señalar que en el Reino Unido, Tom Elliot, introdujo un nuevo detector de HgCdTe con la capacidad de realizar el procesado TDI en el propio filamento detector, conocido originalmente como TED (*Tom Elliot's Device*) y actualmente como SPRITE (*Signal PRocessing In The Element*) [Holst 00]. En los 80 aparecieron nuevos *arrays* de detectores, de PtSi en infrarrojo medio que permiten la fabricación de FPA en grandes dimensiones, y también de pozo cuántico (QWIP, *Quantum Well Infrared Photodetector*) sintonizables en cuanto a su respuesta espectral. En la década de los 90 aparecieron *arrays* de microbolómetros para el infrarrojo térmico cuya principal característica era que no necesitaban refrigeración, revolucionando estos sistemas en cuanto a tamaño, consumo, portabilidad y robustez. Las tendencias actuales van encaminadas al diseño de microcámaras IR con detectores de microbolómetros de VO_x [website 5], BST y de Si-amorfo de reciente aparición [Shimert 00] [website 4].

Desde que se desclasificaron estas tecnologías y dada la diversidad de campos y la gran cantidad de aplicaciones posibles fuera del ámbito militar, ha habido una gran proliferación de compañías que aportan diferentes soluciones en la realización de cámaras IR. En un principio, los detectores utilizados se componían de un solo elemento, haciendo necesario un barrido óptico para la formación de la imagen. La aparición de los *arrays* lineales y matriciales consiguió la eliminación total o parcial del barrido, pero es necesario señalar que dependiendo del material detector la dificultad tecnológica para la construcción del *array* es muy diferente.

Entre las tendencias actuales en el diseño de cámaras IR cabe destacar:

- *Fabricación de FPA de gran formato* en diferentes materiales:

- InSb (3 – 5 μm) de 256x256 e incluso de 640x512 elementos.
- PtSi (3 – 5 μm) hasta de 1024x1024 elementos.
- HgCdTe *arrays* de 320x256 (3 – 5 μm) y 1028 x 4 (8 – 12 μm). Con este material los *arrays* no se han fabricado hasta una fecha bastante reciente, debido a su complejidad tecnológica y a la dificultad para uniformizar la respuesta de los detectores sobre todo en el infrarrojo térmico [Wolfe 96].
- *Evolución de los sistemas de refrigeración* desde el nitrógeno líquido, muy utilizado en los comienzos, hasta el uso generalizado de ciclos Stirling capaces de alcanzar 77 K, cada vez con un tamaño más reducido, más silenciosos y un tiempo de vida más elevado.
- *Aparición de nuevos detectores* que aportan nuevas y variadas ventajas:
 - *Arrays* lineales de PbSe (3 – 5 μm), que trabajan a 195 K, empleando refrigeración termoeléctrica en varias etapas.
 - *Arrays* de microbolómetros que no necesitan refrigeración del detector, solamente estabilización termoeléctrica. Las tecnologías utilizadas son:
 - Semiconductores de VO_x (8 – 12 μm).
 - Ferroeléctricos BST (7 – 13.5 μm).
 - Si amorfo (8 – 12 μm).

Con estos materiales se comercializan microcámaras IR, que emplean *arrays* de 128x128 y 160x120 píxeles [website 5] [website 4].
- *Ampliación de las bandas espectrales*:
 - Mediante compuestos cuaternarios (InGaAsP), o ternarios como el InGaAs para la detección en la ventana atmosférica de 0.9 – 1.7 μm , denominada infrarrojo corto (SIR, *Short InfraRed*).
 - Con de detectores de pozo cuántico QWIP de GaAs, con una selectividad espectral mucho mayor e incluso sintonizable. La banda de trabajo suele ser de 8.0 – 9.2 μm .
- *Evolución rápida de la electrónica*, que ha incidido tanto en el propio sistema de imagen para el acondicionamiento y lectura de *arrays* cada vez mayores, como en los sistemas de adquisición de datos e imagen. En la actualidad es posible acceder tanto a la señal de vídeo compuesto como a las imágenes digitales

generadas por el sistema, con una velocidad de transferencia que puede llegar a más de 1000 imágenes por segundo.

2.4.6. Elección de la banda espectral de trabajo

Las dos bandas espectrales que se utilizan en termografía habitualmente son el infrarrojo medio, MIR y el térmico, TIR. Para elegir la banda adecuada deberemos tener en cuenta una serie de factores atendiendo al objeto del estudio y las condiciones de medida (fondo, etc). Estos factores son [Gaussorgues 89]:

- *Emisividad espectral.* – En termografía es muy importante conocer la emisividad espectral de los cuerpos que se pretenden medir. Así, por ejemplo, no es posible realizar termografía en superficies con emisividades muy bajas, como los metales pulidos, debido a la relación tan desfavorable entre la emisión propia y la reflejada de los alrededores. En el caso de los radiadores selectivos, es vital conocer el intervalo espectral donde la emisividad es más elevada. Un ejemplo claro de radiador selectivo, como se vio en la introducción, son las llamas, donde la emisión se produce principalmente en la banda de emisión del CO₂, en la región MIR.
- *Potencia radiada.* – La exitancia de la fuente varía notablemente con la temperatura a la que se encuentre. Integrando la ley de Planck en cada una de las dos bandas para un cuerpo negro a diferentes temperaturas obtenemos los valores que aparecen en la tabla 2.3. Al hacer la relación entre la exitancia de la banda TIR (8 – 12 μm) respecto de la MIR (3 – 5 μm), si nos atuviésemos exclusivamente a este criterio observamos que sería conveniente utilizar la banda TIR para objetos a bajas temperaturas y la MIR para objetos a altas temperaturas (figura 2.16).

Temperatura (K)	300	350	400	450	500	1000
M _{MIR} (W/cm ²)	5.97 10 ⁻⁴	2.86 10 ⁻³	9.51 10 ⁻³	2.46 10 ⁻²	5.32 10 ⁻²	2.05
M _{TIR} (W/cm ²)	1.22 10 ⁻²	2.47 10 ⁻²	4.22 10 ⁻²	6.46 10 ⁻²	9.14 10 ⁻²	0.5
M _{TIR} / M _{MIR}	20.6	8.7	4.5	2.2	1.7	0.25

Tabla 2.3. – Relación de la exitancia en las bandas MIR y TIR a diferentes temperaturas

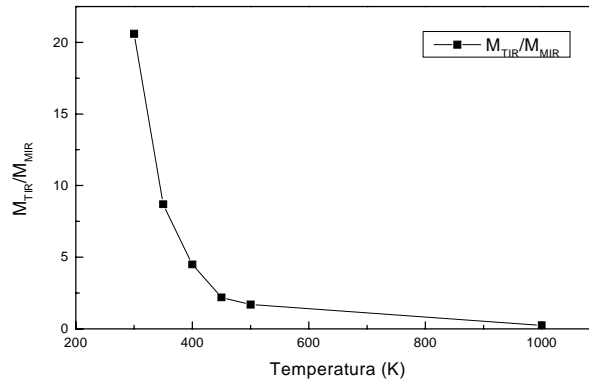


Figura 2.16. – Relación de la exitancia en las bandas TIR y MIR en función de la temperatura.

- *Contraste térmico.* – Este concepto expresa la capacidad de distinguir dos zonas de la escena con diferente temperatura (o con la misma temperatura pero diferente emisividad). En la práctica este criterio es más importante que el de la potencia total radiada, ya que define la discriminación radiométrica.

Podemos definir el contraste térmico entre dos cuerpos negros a temperaturas T_1 y T_2 , para una banda espectral $\Delta\lambda$, por la expresión [Gaussorgues 89]:

$$C_{\Delta\lambda}(T_1, T_2) = \frac{M_{\Delta\lambda}(T_2) - M_{\Delta\lambda}(T_1)}{M_{\Delta\lambda}(T_2) + M_{\Delta\lambda}(T_1)} \quad [2.56]$$

donde $M_{\Delta\lambda}$ es la exitancia en una banda dada.

Cuando queremos discernir diferencias de temperaturas pequeñas, se puede definir con mayor precisión una función de *contraste térmico diferencial relativo*, definido para el intervalo espectral de trabajo:

$$C_{\Delta\lambda}(T) = \frac{\left[\frac{dM(T)}{dT} \right]_{\Delta\lambda}}{M(T)_{\Delta\lambda}} \quad [2.57]$$

Para una temperatura dada la función anterior presenta un máximo a una longitud de onda, λ_C , cuya relación con la longitud de máxima emisión λ_{\max} dada por la ley de Wien (expresión [2.4]) es la siguiente [Hudson 69]:

$$\lambda_C = 0.832 \lambda_{\max} \quad [2.58]$$

Siendo, por ejemplo, para una $T = 300$ K, la longitud de onda de máximo contraste $\lambda_C = 8 \mu\text{m}$.

En la tabla 2.4 se muestra un estudio del contraste térmico diferencial para las bandas MIR y TIR a varias temperaturas, donde se encuentra que para diferencias de temperaturas pequeñas, el contraste en la banda MIR es 2.2 veces mayor que en la TIR, en un intervalo muy amplio de temperaturas. En la figura 2.17 se ha representado dicho contraste en ambas bandas [Gaussorgues 89].

Temperatura (K)	260	300	373	500	573	1000
$C_{3-5\mu m} (10^{-2} K^{-1})$	4.74	3.60	2.40	1.40	1.09	0.39
$C_{8-12\mu m} (10^{-2} K^{-1})$	2.14	1.62	1.08	0.63	0.50	0.20
$C_{3-5\mu m} / C_{8-12\mu m}$	2.21	2.22	2.22	2.22	2.19	1.97

Tabla 2.4. – Contraste térmico diferencial relativo para diferentes temperaturas.

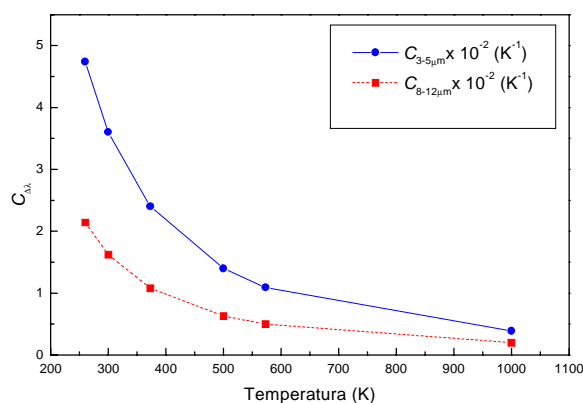


Figura 2.17. – Contraste térmico diferencial para las bandas MIR y TIR.

- *Transmisión atmosférica.* – Para distancias cortas puede despreciarse su influencia en ambas bandas, pero cuando la distancia es considerable se debe calcular el coeficiente de transmisión para decidir cual es la banda adecuada. En general la humedad afecta de una forma más acusada a la banda TIR, mientras que los aerosoles y brumas y la presencia de CO_2 afectan a la MIR.
- *Detectores.* – La sensibilidad del sistema no sólo depende de la radiancia incidente, sino también de la capacidad de los detectores para detectarla. En la figura 2.14 se puede apreciar que la D^* del InSb es superior a la del mejor detector en la banda TIR, el HgCdTe, y también puede comprobarse que los detectores cuánticos que se utilizan en la actualidad están prácticamente en el límite de detección teórico.

- *Radiaciones parásitas y reflejos.* – Las radiaciones parásitas debidas al propio sistema afectan más a la banda TIR, dado que la temperatura a la que se encuentra el sistema es la ambiente y la longitud de onda máxima de emisión se encuentra en esa banda. Por el contrario, los reflejos solares difusos afectan mucho más a la banda MIR.

Todos estos factores deben estudiarse para la elección de la mejor banda de trabajo en cada caso concreto (como ejemplo, véase el completo estudio de Findlay para ambientes tropicales marinos [Findlay 89]).

En el caso del estudio de llamas, estos factores apuntan a que es claramente más conveniente la banda MIR. Es claro, sin embargo, que la utilización de ambas bandas aportará más información acerca del fenómeno objeto del estudio. Por ejemplo, la utilización de medidas biespectrales nos permite la medida simultánea de la temperatura y la emisividad de cuerpos grises. De este modo es posible detectar diferentes zonas de un mismo cuerpo que pueden estar a la misma temperatura y en las que su emisividad cambia, un problema que no se podría dilucidar con la utilización de una sola banda.

Cuando se trata de cuerpos cuya emisividad depende fuertemente de la longitud de onda, las medidas biespectrales cobran aún mayor relevancia, y van a permitir diferenciar zonas que con una sola banda aparecerían con la misma temperatura de brillo. Este caso es importante, como veremos en los capítulos siguientes, en el análisis de llamas y la detección de incendios forestales.

2.5. El sistema sensor: espectrómetros de imagen IR

Como se explico en el capítulo 1, la instrumentación infrarroja se ha dividido tradicionalmente en dos grandes grupos: *los sistemas de imagen*, con resolución espacial, y *los sistemas espectralradiométricos*, con resolución espectral. La evolución natural de la instrumentación infrarroja se ha dirigido, por una parte, a la mejora de las resoluciones espacial y espectral en los sistemas anteriores, y, por otra parte, a la construcción de nuevos instrumentos que posean, simultáneamente, resolución espacial y espectral: los denominados *espectrómetros de imagen*. La aparición de esta instrumentación, combinada con los avances llevados a cabo en el procesado y almacenamiento de datos, ha generado una nueva y poderosa herramienta para el

estudio de la escena IR: la *espectrometría de imagen* [Schott 97] [Wolfe 97]. El espectrómetro de imagen más sencillo posible es un *sistema biespectral* con solo dos bandas. El sistema desarrollado en este trabajo, cuyas características se detallan en la sección 3.1, es de este tipo. A lo largo de este trabajo veremos como, a pesar de poseer sólo dos bandas relativamente anchas, supone un salto cualitativo para la optimización de la detección.

Los espectrómetros de imagen han evolucionado hacia la incorporación de bandas más estrechas y en mayor número dentro de las ventanas atmosféricas. Las bandas adicionales, tienen gran utilidad práctica en el estudio de problemas específicos. Los *sistemas multispectrales* (*multispectral scanners*) utilizan varias bandas, inicialmente en el visible y el infrarrojo próximo (NIR), y que posteriormente se han extendido al IR medio y térmico. Se han utilizado ampliamente, aerotransportados y embarcados en satélite (Landast, NOAA, SPOT, EOS, etc), en aplicaciones de teledetección de recursos, estudio de la superficie terrestre y meteorológicas.

La posibilidad de conseguir mejor resolución espectral y mayor número de bandas, propició la aparición de *sistemas ultraespectrales* con una resolución de 0.1 μm , e *hiperespectrales* que llegan a una resolución de 0.01 μm y pueden tener cientos de bandas [Breckinridge 96][Wolfe 97][Hinrichs 00]. Estos sistemas de alta resolución, y cuyas bandas son contiguas, son a los que comúnmente se refiere la literatura actual con el término *espectrómetros de imagen*, aunque estrictamente puede llamarse así a cualquier sistema de imagen con más de una banda que cumpla los requisitos de correlación espacial, temporal y radiométrica que mencionamos en la introducción.

Los métodos utilizados para dotar a los espectrómetros de imagen de resolución espectral son muy variados [Wolfe 97][Hinrichs 00] y han ido evolucionando y ganando en complejidad a la par de los sistemas de imagen. Se han utilizado:

- Ruedas portafiltros con filtros interferenciales paso banda en longitudes de onda discretas.
- Filtros interferenciales circulares variables en donde la banda espectral que se deja pasar es sintonizable.
- Sistemas dispersivos como prismas de Ge, redes de difracción, interferómetros de Michelson o de Fabry-Perot, óptica difractiva (como se verá con más detalle a lo largo de esta sección al describir la instrumentación hiperespectral utilizada en este trabajo en los siguientes capítulos).

No existe una solución óptima para todas las aplicaciones y por ello en cada caso se deberá estudiar cual de ellos es el más conveniente. Una discusión más pormenorizada de las diferentes opciones actuales, en cuanto a las prestaciones de los diferentes espectrómetros de imagen, puede verse en [Hinnrichs 00] y [Wolfe 97].

2.5.1. Concepto de espectrometría de imagen

Un espectrómetro de imagen proporciona una serie de imágenes co-registradas y simultáneas (o cuasi-simultáneas) de la misma escena, cada una de ellas en una banda espectral diferente, obteniéndose lo que suele denominarse una “*imagen cúbica*”. Al estudiar la señal de un determinado píxel para toda la serie de imágenes, obtenemos un espectro de ese punto de la escena; pero ahora, a diferencia de lo que ocurre en espectrorradiometría sabemos a qué posición espacial concreta de la escena corresponde ese espectro. Naturalmente, la resolución de ese espectro dependerá del número de bandas del sistema. En los sistemas hiperspectrales ésta es comparable a la de los espectrorradiómetros convencionales, no obstante, para muchas aplicaciones, la resolución de los sistemas multiespectrales, o incluso biespectrales, es suficiente.

El primer sistema hiperspectral fue construido a principios de los 80 por el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) de la NASA. Se denominó AIS (*Airborne Imaging Spectrometer*) y disponía de 128 bandas de 10 nm de anchura de 1.2 a 2.4 μm [Campbell 96][Lillesand 94][Shcott 97]. Desde finales de los 80, el principal sistema hiperspectral en funcionamiento ha sido el AVIRIS (*Advanced Visible and Infrared Imaging Spectrometer*), también construido por el JPL y con 224 bandas de 10 nm, en el visible y en el infrarrojo próximo, desde 0.4 a 2.8 μm y con una resolución espacial de 20 m [website 6][Campbell 96][Lillesand 94][Shcott 97]. Este espectrómetro de imagen se utiliza embarcado en un avión ER-2 de la NASA, básicamente porque es un sistema tan complejo que era inviable lanzarlo en un satélite, ya que consume gran cantidad de energía y proporciona una cantidad tan enorme de datos que no era posible enviarlos o almacenarlos para su posterior envío. Sin embargo, recientemente, en noviembre de 2000, la NASA ha puesto en órbita embarcado en el satélite EO-1, un sistema hiperspectral denominado *Hyperion* con 220 bandas entre 0.4 y 2.5 μm y con una resolución espacial de 30 m [website 7] [website 8].

La figura 2.18, es un ejemplo de una “imagen cúbica” de 224 bandas de 10 nm de resolución espectral, que se obtiene con el espectrómetro de imagen AVIRIS. Una de

las aplicaciones de este espectrómetro de imagen es la realización de test de espectrómetros de imagen menos complejos y con menos bandas que posteriormente serán embarcados en satélites, como por ejemplo el sensor MODIS de 36 bandas [Schott 97][Campbell 96]. También se utiliza en aplicaciones geológicas, de búsqueda de recursos hídricos, estudio de la vegetación, del clima, etc. En la parte derecha de la figura se muestra el espectro que se obtendría para cada uno de los píxeles seleccionados, donde se refleja claramente la potencia de este tipo de imágenes.

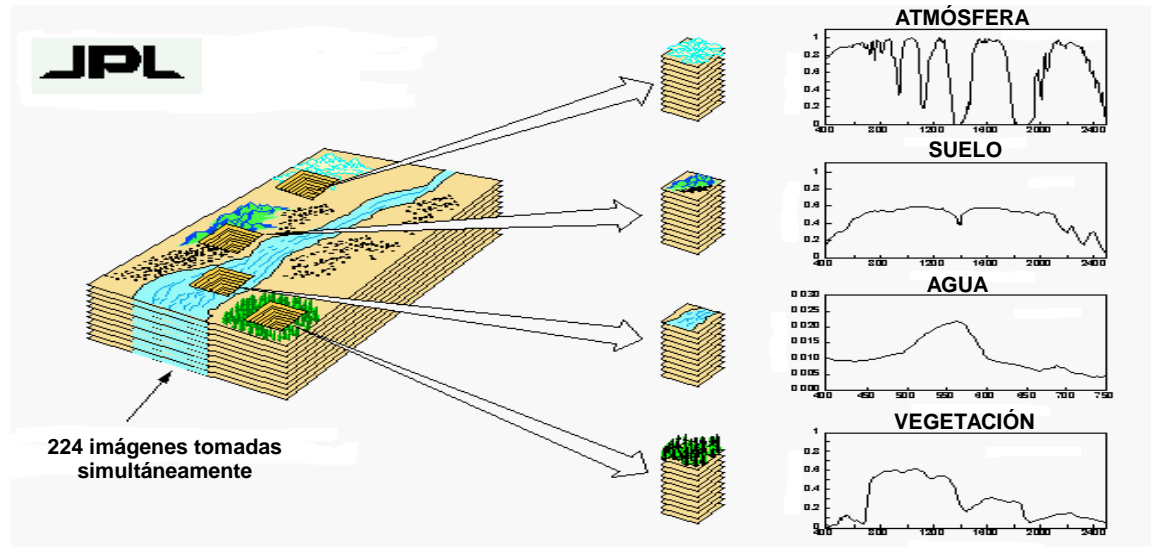


Figura 2.18. – Ejemplo de imagen cúbica obtenida con un espectrómetro de imagen y de la información que se puede obtener de la misma (adaptada de [website 6]).

Además de la información espacial (bidimensional) y la temporal, ahora también tenemos información espectral lo que añade una nueva dimensión a los datos y aumenta enormemente su volumen. Es evidente la potencia computacional y de almacenamiento necesaria para trabajar con un espectrómetro de imagen que posea alta resolución espacial, espectral y radiométrica. Para extraer el máximo rendimiento de la espectrometría de imagen serán necesarias unas técnicas de procesado y de tratamiento estadístico de datos específicas. Este tema será tratado en el capítulo 4.

2.5.2. Sistema hiperespectral en el infrarrojo medio

Nuestro laboratorio dispone de un sistema hiperespectral de imagen denominado *Image Multi-Spectral Sensor* (IMSS) (sección 3.4). El sistema opera en la banda MIR de 3 a 5 μm , acoplándose a la cámara que se utilizará en este trabajo en esa banda (apartado 3.2.1). Para conseguir resolución espectral utiliza una *óptica difractiva* que

dispersa las longitudes de onda a lo largo del eje óptico, y que también se usa para enfocar sobre el detector de la cámara a la que se acopla [IMSS 97]. Esta técnica innovadora fue inventada y patentada por *Pacific Advanced Technology* [website 9].

Concepto de IMSS

Para entender el funcionamiento y los principios físicos en los que se basa el modo de operación de este espectrómetro de imagen, vamos a compararlo con el principio de funcionamiento de un monocromador convencional.

Un monocromador convencional, utiliza un prisma o una red de difracción para dispersar la luz, es decir, separarla en longitudes de onda perpendicularmente al eje óptico. La luz penetra a través de una rendija de entrada, y es seleccionada con una rendija de salida. La resolución espectral se aumenta estrechando las rendijas, pero ello reduce la cantidad de energía que entra en el sistema. Éste es el principal inconveniente de un sistema de este tipo para realizar imagen hiperespectral [IMSS 97][Hinnrichs 00].

En el IMSS, la radiación incidente es dispersada mediante una óptica difractiva, a la vez que enfoca las diferentes longitudes de onda a lo largo del eje óptico del sistema. Para obtener imágenes en las diferentes longitudes de onda, la posición de la óptica respecto del detector se modifica mediante un motor paso a paso controlado por una aplicación informática (apartado 3.4.2). En la figura 2.19 se puede comparar el concepto de IMSS frente al de un monocromador. La principal ventaja que presenta este sistema para hacer imagen hiperespectral, es que la propia lente hace de rendija de entrada, y el detector de rendija de salida, de forma que se recoge más cantidad de energía que en un monocromador.

La óptica ha sido diseñada para que la profundidad de foco sea muy pequeña, de forma que toda la radiación dispersada a lo largo del eje óptico del sistema quede desenfocada rápidamente para cualquier posición de la lente, excepto para la longitud de onda que debe enfocar. No obstante, no se puede evitar un ligero solapamiento espectral de energía proveniente de las longitudes de onda anteriores y posteriores a la enfocada (figura 2.20). De forma que la resolución del sistema que es de 10 nm @ 4 μ m, queda ensanchada hasta 42 nm, por el solapamiento de la radiación incidente de bandas contiguas. Esto hace que las imágenes obtenidas con este sistema sean un tanto borrosas (no obstante PAT ha desarrollado algoritmos de procesado de imagen para corregir este efecto [IMSS 97] [HyPAT II 01]).

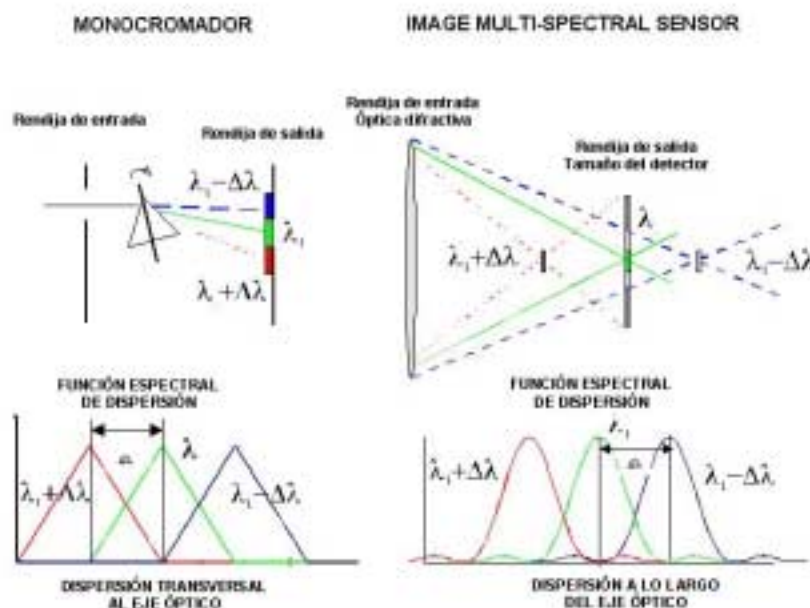


Figura 2.19. – Modo de funcionamiento de un monocromador convencional (izquierda) y concepto de IMSS (derecha) (adaptada de [Hinnrichs 97]).

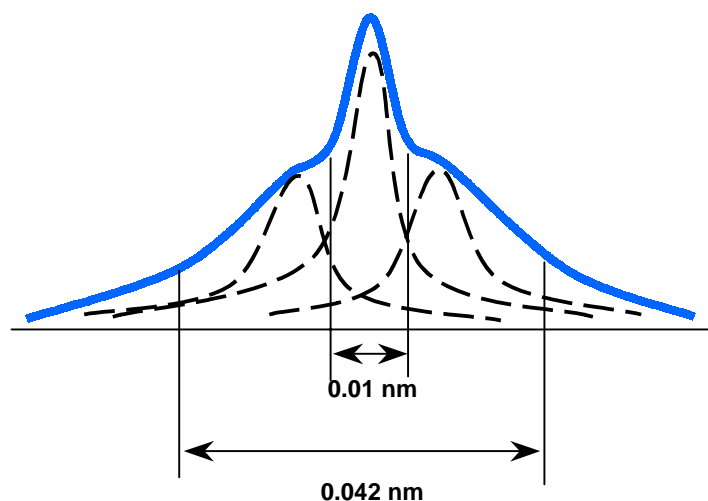


Figura 2.20. – Gráfica de la contribución de energía de las longitudes de onda adyacentes desenfocadas para una imagen centrada en $4 \mu\text{m}$ (adaptada de [IMSS 97]).

2.6. Calibración radiométrica

Una vez examinado por separado cada uno de los elementos que intervienen en el proceso de la teledetección IR, vamos a estudiar ahora el proceso en su conjunto. En lugar de la *estructura* del sistema, nos interesa ahora su *funcionalidad*. El objetivo será

encontrar la relación entre el número digital (ND, valor de cada píxel de la imagen) y las propiedades de la fuente IR detectada.

2.6.1. Planteamiento del problema

En la introducción se enumeraron las ventajas de la detección de contrastes térmicos y medida de temperatura mediante termografía, así como otras muchas aplicaciones. No obstante, debemos señalar que la medida de temperatura con estos equipos entraña no pocas dificultades, debido a la cantidad de factores que intervienen y que se deben tener en cuenta para que la medida sea correcta (figura 2.21).

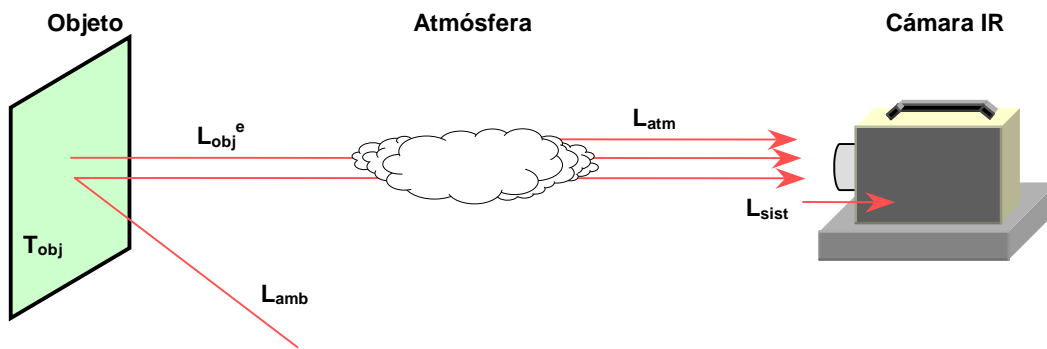


Figura 2.21. – Ejemplo sencillo de teledetección IR.

Comenzamos por un caso sencillo: la observación directa de un objeto mediante una cámara IR. La radiancia incidente sobre la cámara L_{in} está formada por diferentes términos. Además de la radiancia emitida por el objeto, L_{obj}^e , tendremos una contribución de la radiancia emitida por los alrededores del objeto, L_{amb} , y reflejada por éste. Si la emisividad del objeto es ϵ_{obj} y si éste es opaco, la reflectancia será $\rho_{obj} = (1 - \epsilon_{obj})$ y por tanto este término valdrá $L_{amb}(1 - \epsilon_{obj})$. Hay que añadir la radiancia emitida por la atmósfera, L_{atm} , que es recogida directamente por la óptica y también se deberá tener en cuenta la emisión propia de la óptica y demás partes del sistema, L_{sist} . Por tanto la radiancia incidente será,

$$L_{in} = [L_{obj}^e + L_{amb} (1 - \epsilon_{obj})] \tau_{atm} + L_{atm} + L_{sist} \quad [2.59]$$

donde hemos tenido en cuenta la transmitancia atmosférica τ_{atm} .

Se puede comprobar que, incluso en este caso tan sencillo, intervienen gran cantidad de factores en la medida. Sin embargo, para medidas a cortas distancias realizadas en una ventana atmosférica podemos considerar que la transmitancia

atmosférica es prácticamente la unidad, y en consecuencia su emisividad y por tanto su radiancia L_{atm} es despreciable. Si también despreciamos la emisión propia del sistema L_{sist} , obtenemos una expresión más sencilla:

$$L_{\text{in}} = L_{\text{obj}}^{\text{e}} + L_{\text{amb}} (1 - \epsilon_{\text{obj}}) \quad [2.60]$$

que podemos desarrollar como:

$$L_{\text{in}} = L^{\text{CN}}(T_{\text{obj}}) \epsilon_{\text{obj}} + L^{\text{CN}}(T_{\text{amb}}) (1 - \epsilon_{\text{obj}}) \quad [2.61]$$

donde hemos escrito que la radiancia emitida por el objeto es $L_{\text{obj}}^{\text{e}} = L^{\text{CN}}(T_{\text{obj}}) \epsilon_{\text{obj}}$, siendo $L^{\text{CN}}(T_{\text{obj}})$ la radiancia emitida por un cuerpo negro a la temperatura del objeto, según la ley de Planck, y hemos considerado, como es habitual, el ambiente como un cuerpo negro a T_{amb} .

Con las aproximaciones realizadas, la radiancia incidente sobre la cámara depende de la temperatura del objeto, de su emisividad, y de la temperatura ambiente. Si conocemos ésta última y obtenemos la radiancia a partir de la medida de la cámara, podemos determinar:

- La temperatura del objeto, T_{obj} , si conocemos su emisividad.
- La emisividad del objeto, ϵ_{obj} , si conocemos su temperatura.

Pese a su sencillez, este ejemplo pone de manifiesto que las técnicas de teledetección no proporcionan medidas directas. Por el contrario, para extraer la información es necesario complementar la medida con:

- Un *modelo del sistema sensor*, para obtener la radiancia incidente a partir del número digital proporcionado por el sistema.
- Un *modelo del escenario*, que estará compuesto a su vez de:
 - Un *modelo del ambiente*, para estimar las distintas contribuciones a la radiancia incidente y hacer las aproximaciones oportunas para, a partir de ésta, estimar la radiancia emitida por el objeto.
 - Un *modelo del objeto*, que relacione la radiancia emitida con la temperatura del objeto (para lo que será necesario conocer su emisividad) o con su emisividad (para lo que se necesitará saber su temperatura).

Cuando dispongamos de un modelo de sistema sensor y un modelo del escenario convenientemente validados, diremos que el sistema está calibrado. Podremos encontrar entonces la relación entre la señal de salida de la cámara (ND) y la radiancia emitida por el cuerpo objeto de estudio ($L_{\text{obj}}^{\text{e}}$). Como hemos visto ya, y quedará más claro en las

secciones siguientes, esta relación no es inmediata y depende de numerosos factores [Ryu 90][Torbjörn 91]. Una vez determinada la radiancia emitida por el cuerpo se podrá calcular su temperatura o su emisividad, según el caso.

2.6.2. Componentes de la radiancia incidente en una medida en el infrarrojo

Partiremos del supuesto básico de que la relación existente entre la potencia de radiación incidente sobre el detector Φ_D , y el correspondiente valor proporcionado por el conversor AD (es decir, el ND) es lineal. Esta suposición se puede considerar correcta en la zona central de trabajo del conversor AD (es decir prescindiendo del 5 % de los valores en las zonas extremas donde pierde su linealidad) [Radiance 1 93].

La potencia de radiación incidente será:

$$\Phi_D = E_D \cdot A_D \quad [2.62]$$

siendo E_D la irradiancia recibida sobre el elemento detector de área A_D . Podremos escribir esta irradiancia como [2.25]:

$$E_D = L_D \cdot \Omega_D \quad [2.63]$$

siendo L_D la radiancia que llega al detector y Ω_D el ángulo sólido proyectado con el que le llega la radiación. Así pues, la potencia incidente y la radiancia sobre el detector son proporcionales. Esto nos permite trabajar con la radiancia que, como veremos, será una magnitud más adecuada [Schowengerdt 97]:

$$\Phi_D = E_D \cdot A_D = L_D \cdot \Omega_D \cdot A_D \quad [2.64]$$

Como la señal de salida de cada detector está relacionada linealmente con la potencia de radiación incidente, Φ_D , vemos, teniendo en cuenta la expresión [2.64], que su relación con la radiancia detectada L_D también será lineal. La señal de salida del detector será de la forma:

$$ND = Gain_d \cdot L_D + Offset_d \quad [2.65]$$

Una parte importante de la calibración será determinar los parámetros $Gain_d$ y $Offset_d$, en los que se resume el modelo del sensor, aunque como veremos en el apartado 2.6.3, será más práctico obtener unos parámetros globales para toda la imagen ($Gain_{cam}$ y $Offset_{cam}$) que dependerán de la cámara y de la lente utilizada. Antes de hacerlo, estudiaremos la relación entre la radiancia detectada y la radiancia emitida por el objeto; es decir, el modelo del objeto.

Invariancia de la radiancia

La conveniencia de trabajar con la radiancia se debe a su propiedad de *invariancia* (apartado 2.2.4). En virtud de ésta, y considerando que no hay absorción ni dispersión en el medio, se cumple que:

$$L_D = L_{in} = L_{obj}^t \quad [2.66]$$

siendo L_{in} la radiancia incidente en la cámara y L_{obj}^t la radiancia total saliente del objeto. Esta radiancia será la suma de la emitida y la reflejada:

$$L_{obj}^t = L_{obj}^e + L_{obj}^r \quad [2.67]$$

Radiancia emitida

La radiancia emitida por el objeto L_{obj}^e depende de la temperatura del objeto T_{obj} y de su emisividad, ϵ_{obj} . Si denotamos por $L^{CN}(T)$ la radiancia emitida por un cuerpo negro a la temperatura T , según la ley de Kirchhoff [2.6], tendremos que la radiancia emitida por un cuerpo a temperatura T_{obj} estará dada por la expresión:

$$L_{obj}^e = \epsilon_{obj} \cdot L^{CN}(T_{obj}) \quad [2.68]$$

Radiancia reflejada

La radiancia reflejada por el objeto L_{obj}^r depende de la radiación que recibe el cuerpo y de su reflectancia ρ_{obj} . Se deben distinguir dos posibles casos de configuración de medida:

- *Sin fuentes externas.* – Las únicas fuentes de radiación son el objeto observado y el ambiente. En este caso la radiación reflejada por el objeto es debida a la emisión de los alrededores, es decir, del ambiente.

$$L_{obj}^r = L_{amb}^r \quad [2.69]$$

En el infrarrojo el ambiente se suele considerar como un cuerpo negro a temperatura T_{amb} . Entonces,

$$L_{amb}^r = \rho_{obj} \cdot L^{CN}(T_{amb}) = (1 - \epsilon_{obj}) \cdot L^{CN}(T_{amb}) \quad [2.70]$$

Hemos considerado que el cuerpo es opaco de modo que $\tau_{obj} = 0$ y por tanto $\alpha_{obj} + \rho_{obj} = 1$ y como $\alpha = \epsilon$, se tiene que $\rho_{obj} = 1 - \epsilon_{obj}$.

- *Con fuentes externas.* – Además del objeto observado y el ambiente, hay otras fuentes que pueden ser artificiales, caso de la detección activa, o naturales (como el sol). En este caso escribiremos:

$$L_{obj}^r = L_{amb}^r + L_{sol}^r \quad [2.71]$$

Donde L_{sol}^r se refiere a cualquier fuente externa, que por claridad identificaremos siempre con el sol.

La radiación solar que refleja el objeto tiene dos componentes, una debida a la reflexión solar directa y otra debida a la reflexión de la radiación solar dispersada por la atmósfera, por tanto,

$$L_{obj}^r = L_{amb}^r + L_{sol}^r + L_{sol}^{disp+r} \quad [2.72]$$

En el caso más general tendremos por tanto que la radiación saliente del objeto será,

$$L_{obj}^t = L_{obj}^e + L_{amb}^r + L_{sol}^r + L_{sol}^{disp+r} \quad [2.73]$$

Efectos atmosféricos

La radiancia saliente del objeto no es, sin embargo, la que llega al detector. Como hemos visto, la atmósfera influye en la transmisión de la radiación, debido a los fenómenos de absorción y dispersión, pero también debido a su propia emisión. Por tanto, para incluir estos efectos debemos describir [2.66] en la forma

$$L_{in} = \tau_{atm} \cdot L_{obj}^t + L_{atm}^e \quad [2.74]$$

Donde $\tau_{atm} \neq 1$ y L_{atm}^e recoge la emisión de la atmósfera situada entre el objeto y la cámara. Dado que $\rho_{atm} = 0$, tenemos que $\epsilon_{atm} = 1 - \tau_{atm}$, quedando,

$$L_{atm}^e = (1 - \tau_{atm}) \cdot L^{CN}(T_{atm}) \quad [2.75]$$

Finalmente, debemos considerar la radiación solar que llega a la cámara una vez dispersada por la atmósfera, L_{sol}^{disp} . Este término puede llegar a ser importante en determinados casos. La expresión final de todos los términos que contribuyen a la radiancia que llega a la cámara es la siguiente,

$$L_{in} = \tau_{atm} \cdot (L_{obj}^e + L_{amb}^r + L_{sol}^r + L_{sol}^{disp+r}) + L_{atm}^e + L_{sol}^{disp} \quad [2.76]$$

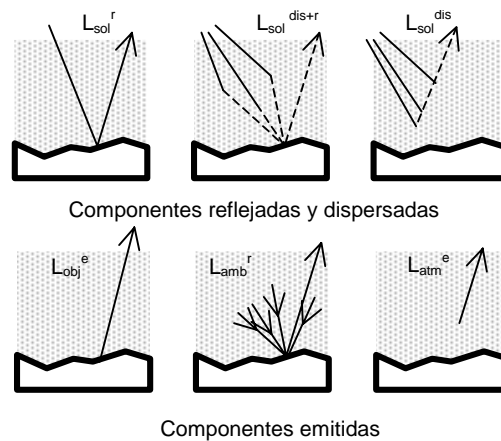


Figura 2.22. – Componentes de la radiancia en teledetección.

Las diferentes contribuciones quedan reflejadas en la figura 2.22, donde aparecen tanto las componentes emitidas como las reflejadas y dispersadas [Schowengert 97]. Las componentes emitidas aparecerán en cualquier medida mientras que las reflejadas y dispersadas debidas a una fuente externa, como por ejemplo el sol, sólo aparecerán cuando ésta exista.

Efectos de la propia cámara

Hasta ahora hemos tenido en cuenta todas las contribuciones posibles a la radiancia que llega a la cámara, pero hemos obviado la influencia de la propia cámara sobre la radiancia que llega al detector. Esta contribución es debida en primer lugar a que la transmitancia de la óptica (supuesta refractiva) es menor que la unidad ($\tau_{\text{opt}} < 1$), y por tanto atenúa la radiación incidente y también emite ($\epsilon_{\text{opt}} = (1 - \tau_{\text{opt}})$). Este efecto es muy importante cuando se utilizan filtros y diafragmas para atenuar la radiación incidente y ampliar el rango de utilización de las cámaras.

En segundo lugar, también debemos tener en cuenta la propia emisión de la cámara debido al calentamiento que sufre por su funcionamiento [Torbjörn 91]. Estos efectos son mucho más acusados para las *cámaras de barrido (scanning)* ya que su óptica es mucho más compleja, con un número elevado de elementos refractivos y reflejantes (figura 2.13). En las cámaras con tecnología FPA, que utilizan una óptica más sencilla, y donde el detector se encuentra situado en un criostato (figura 3.1, izquierda), este efecto tiene menor peso y se podrá despreciar frente a otras contribuciones. La emisión propia de la cámara afecta más en $8 - 12 \mu\text{m}$ que en $3 - 5 \mu\text{m}$ [Torbjörn 91]. Un parámetro importante de esta contribución a la radiancia recibida por el detector es el tiempo que la cámara lleve trabajando en el momento que se realiza la medida. Este hecho ha sido comprobado en la cámara TIR que utilizamos en este trabajo. Se ha observado un efecto de calentamiento del detector que aumenta con el tiempo de funcionamiento y es mucho más acusado si la temperatura ambiente no está estabilizada (lo ideal es en torno a 22°C). Este efecto provoca la pérdida de rango dinámico de la cámara, al incrementarse enormemente su *offset*. El problema es común a todas las cámaras de microbolómetros no refrigeradas, sobre todo a las de primera generación como la nuestra, y se debe generalmente a una deficiente estabilización termoeléctrica del detector (apartado 4.1.1).

Los efectos de la óptica pueden ser tenidos en cuenta considerando que $\epsilon_{\text{opt}} = (1 - \tau_{\text{opt}})$, y escribiendo por tanto,

$$L_D = \tau_{opt} \cdot L_{in} + (1 - \tau_{opt}) L_{opt} \quad [2.77]$$

donde,

$$L_{opt} = L^{CN}(T_{opt}) \quad [2.78]$$

Finalmente, la expresión de la radiancia detectada será de la forma⁴:

$$L_D = \tau_{opt} \cdot (\tau_{atm} \cdot (L_{obj}^e + L_{amb}^r + L_{sol}^r + L_{sol}^{disp+r}) + L_{atm}^e + L_{sol}^{dis}) + (1 - \tau_{opt}) L_{opt} \quad [2.79]$$

En el diagrama de la figura 2.23 se muestra como las características de cámara y del escenario (el objeto, la atmósfera, el ambiente y las fuentes externas) determinan el número digital.

El problema de la calibración es el inverso: obtener una cierta magnitud física del objeto (normalmente T o ρ) a partir del número digital. La calibración de una cámara debe permitirnos obtener el valor de la radiancia emitida por el objeto (y por tanto, su temperatura, o reflectancia) a partir de los valores de ND. Sin embargo, hemos visto que el ND depende también de otros factores (atmósfera, ambiente y fuentes externas) de una manera bastante compleja (resumida en la figura 2.23). Para obtener la radiancia emitida debemos “descontar” los efectos de esos factores, mediante un modelo que contemple la influencia tanto de las magnitudes externas debidas a la escena IR de la medida, como del propio instrumento de medida, es decir, de la cámara.

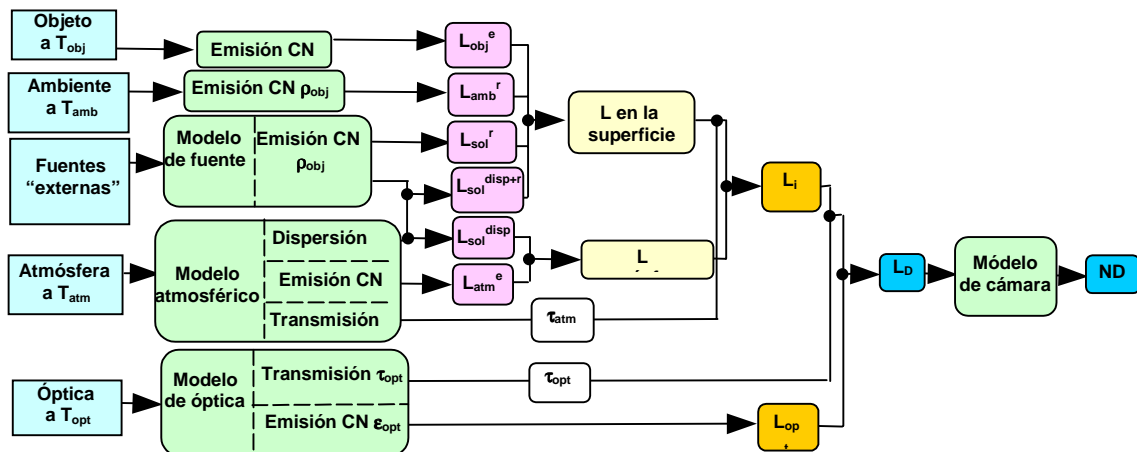


Figura 2.23. – Diagrama de las diferentes contribuciones a la radiancia detectada para la obtención del ND de cada píxel de la imagen.

Por otra parte, en ese modelo se podrán hacer distintas simplificaciones en función del tipo de medida que hagamos y de la banda espectral de trabajo. Por ejemplo, en teledetección desde satélites en el visible e infrarrojo próximo las componentes de

⁴ En esta expresión no se ha tenido en cuenta el “efecto Narciso”, más acusado cuando los objetos de la escena se encuentran a temperatura ambiente o inferior [Dereniak 96].

emisión resultan despreciables frente a las reflejadas y dispersadas, mientras que en el infrarrojo térmico ocurre exactamente lo contrario [Schowengerdt 97]. En el infrarrojo medio se debe tener en cuenta ambas contribuciones.

2.6.3. Calibración en temperatura de brillo

Si en nuestras condiciones de medida se pueden despreciar las componentes reflejadas y dispersadas de fuentes “externas” (tanto del sol como de otras fuentes artificiales), la expresión [2.79] quedará,

$$L_D = \tau_{opt} \cdot (\tau_{atm} \cdot (L_{obj}^e + L_{amb}^r) + L_{atm}^e) + (1 - \tau_{opt}) L_{opt} \quad [2.80]$$

Utilizando las expresiones [2.68], [2.70], [2.75] y [2.78] para cada una de las contribuciones a la medida obtenemos,

$$L_D = \tau_{opt} [\tau_{atm} (\epsilon_{obj} L^{CN}(T_{obj}) + (1 - \epsilon_{obj}) L^{CN}(T_{amb})) + (1 - \tau_{atm}) L^{CN}(T_{atm})] + (1 - \tau_{opt}) L^{CN}(T_{opt}) \quad [2.81]$$

Esta ecuación muestra la relación entre la temperatura del objeto que se desea medir (T_{obj}), su emisividad (ϵ_{obj}) y la radiancia incidente. Es la ecuación básica de la termografía IR, válida para la mayor parte de los casos de medidas en el infrarrojo desde tierra, incluyendo las realizadas en este trabajo.

Lo habitual en termografía (y en nuestro caso) es querer averiguar T_{obj} , para lo cual hay que despejar $L^{CN}(T_{obj})$ de [2.81]. Quedará en función de los parámetros τ_{opt} , T_{opt} , τ_{atm} , T_{atm} , ϵ_{obj} , T_{amb} y de L_D , que obtenemos del ND medido por la cámara mediante la ecuación [2.65] (conociendo $Gain_d$ y $Offset_d$). Una vez obtenido $L^{CN}(T_{obj})$, obtenemos T_{obj} invirtiendo la ley de Planck.

Por tanto, la calibración en termografía IR requiere averiguar dos conjuntos de parámetros:

- Parámetros propios de la cámara: τ_{opt} , T_{opt} , $Gain_d$ y $Offset_d$.
- Parámetros propios del escenario: τ_{atm} , T_{atm} , ϵ_{obj} y T_{amb} .

Aunque conocer todos los parámetros es igualmente necesario para poder decir que el sistema está calibrado, los parámetros del escenario cambian de una aplicación a otra. Por eso, cuando se habla de la “calibración de una cámara IR”, suele usarse esa expresión en sentido restringido, refiriéndose a “la determinación del primer grupo de parámetros”.

Este calibrado se realiza en la práctica aplicando la ecuación [2.81] a un caso particular especialmente sencillo. En efecto, en el caso de medidas a cortas distancias y

trabajando en una ventana atmosférica se puede suponer que $\tau_{\text{atm}} \approx 1$, quedando para la expresión anterior⁵,

$$L_D = \tau_{\text{opt}} \cdot [\epsilon_{\text{obj}} \cdot L^{\text{CN}}(T_{\text{obj}}) + (1 - \epsilon_{\text{obj}}) \cdot L^{\text{CN}}(T_{\text{amb}})] + (1 - \tau_{\text{opt}}) \cdot L^{\text{CN}}(T_{\text{opt}}) \quad [2.82]$$

Si el objeto que estamos midiendo es un cuerpo negro, $\epsilon_{\text{obj}} = 1$, tenemos:

$$L_D = \tau_{\text{opt}} \cdot L^{\text{CN}}(T_{\text{obj}}) + (1 - \tau_{\text{opt}}) \cdot L^{\text{CN}}(T_{\text{opt}}) \quad [2.83]$$

Despejando $L^{\text{CN}}(T_{\text{obj}})$,

$$L^{\text{CN}}(T_{\text{obj}}) = [L_D - (1 - \tau_{\text{opt}}) \cdot L^{\text{CN}}(T_{\text{opt}})] \cdot \tau_{\text{opt}}^{-1} \quad [2.84]$$

De [2.84] y despejando L_D de [2.65] se obtiene que,

$$L^{\text{CN}}(T_{\text{obj}}) = [(ND - \text{Offset}_d) \cdot \text{Gain}_d^{-1} - (1 - \tau_{\text{opt}}) \cdot L^{\text{CN}}(T_{\text{opt}})] \cdot \tau_{\text{opt}}^{-1} \quad [2.85]$$

Que podemos agrupar de la forma,

$$L^{\text{CN}}(T_{\text{obj}}) = [ND - (\text{Offset}_d + (1 - \tau_{\text{opt}}) \cdot L^{\text{CN}}(T_{\text{opt}}) \cdot \text{Gain}_d)] \cdot (\tau_{\text{opt}} \text{Gain}_d)^{-1} \quad [2.86]$$

Esta expresión se puede simplificar, definiendo unos parámetros globales, $\text{Offset}_{\text{cam}}$ y Gain_{cam} , que incluyan la transmitancia óptica de la cámara y su emisión propia.

$$\text{Gain}_{\text{cam}} \equiv \tau_{\text{opt}} \text{Gain}_d \quad [2.87]$$

$$\text{Offset}_{\text{cam}} \equiv \text{Offset}_d + (1 - \tau_{\text{opt}}) \cdot L^{\text{CN}}(T_{\text{opt}}) \cdot \text{Gain}_d \quad [2.88]$$

De manera que finalmente la expresión [2.86] queda de forma más compacta como,

$$L^{\text{CN}}(T_{\text{obj}}) = [ND - \text{Offset}_{\text{cam}}] \cdot \text{Gain}_{\text{cam}}^{-1} \quad [2.89]$$

Midiendo ND para varios valores conocidos de radiancia del cuerpo negro, puede determinarse $\text{Offset}_{\text{cam}}$ y Gain_{cam} , tal como se expone en la sección 4.1.

Función de calibrado

Hemos llegado a que, si conocemos $\text{Offset}_{\text{cam}}$ y Gain_{cam} , podemos obtener $L^{\text{CN}}(T_{\text{obj}})$ mediante la ecuación [2.89], y sólo queda invertir la ecuación de Planck para averiguar T_{obj} .

Esto, sin embargo, no es trivial, debido a dos tipos de dificultades. En primer lugar, tanto la transmitancia de la óptica $\tau_{\text{opt}}(\lambda)$, como la responsividad $\Re(\lambda)$ tienen una dependencia espectral, que hasta ahora no hemos considerado. De acuerdo con esto la ecuación [2.77] debería sustituirse por

$$L_D(T_{\text{obj}}) = \int_0^\infty [\tau_{\text{opt}}(\lambda) \cdot L_{\text{in}}(\lambda, T_{\text{obj}}) + (1 - \tau_{\text{opt}}(\lambda)) \cdot L^{\text{CN}}(T_{\text{opt}})] \Re(\lambda) \cdot d\lambda \quad [2.90]$$

⁵ En este tipo de medidas en el infrarrojo, el propio operador puede ser una importante “fuente externa” por lo que es muy importante evitar sus reflexiones.

Esto complica enormemente los cálculos e introduce una corrección muy pequeña, por lo que suele obviarse esta dependencia espectral, utilizando unos valores promedio de $\tau_{\text{opt}}(\lambda)$ y $\Re(\lambda)$ para la ventana de trabajo. De este modo, además, los valores τ_{opt} y \Re quedan en la práctica englobados en los parámetros $\text{Offset}_{\text{cam}}$ y Gain_{cam} y podemos identificar $L^{\text{CN}}(T_{\text{obj}})$ de la ecuación [2.89] con

$$L_D(T, \lambda_i, \lambda_f) = \int_{\lambda_i}^{\lambda_f} L^{\text{CN}}(\lambda, T) d\lambda \quad [2.91]$$

es decir, la integral de la función de Planck entre las longitudes extremas de la banda espectral.

La segunda dificultad proviene de que tenemos que invertir la función [2.91], que es no analítica. Afortunadamente, para unos valores dados de λ_i , λ_f , $L(T, \lambda_i, \lambda_f)$ puede ajustarse con una aproximación aceptable por

$$L_D(T, \lambda_i, \lambda_f) \cong F(T) = \frac{R}{e^{\frac{B}{T}} - F} \quad [2.92]$$

A la función $F(T)$ se le denomina *función de calibrado*. Depende de tres parámetros que son función de λ_i , λ_f : el *factor de respuesta* R , el *factor espectral* B y el *factor de forma* F [Agema 92]. La información esencial está contenida en el parámetro R , cuyas dimensiones son de radiancia, mientras que F es un parámetro adimensional que introduce una pequeña corrección, y B , con dimensiones de temperatura, depende de la normalización realizada para la responsividad espectral del detector y la transmitancia espectral de la óptica. El cálculo de estos parámetros para nuestras cámaras se abordará en el apartado 4.1.2.

La expresión [2.92] es muy útil porque es fácilmente invertible, y a partir de ella se obtiene la función $F^{-1}(L)$ que nos proporciona finalmente la temperatura en función de la radiancia:

$$T = F^{-1}(L) = \frac{B}{\ln\left(\frac{R}{L} + F\right)} \quad [2.93]$$

Resumiendo lo expuesto hasta aquí, cuando la cámara enfoca un cuerpo negro a corta distancia en una ventana atmosférica, podemos obtener la temperatura del cuerpo negro aplicando la función inversa, $F^{-1}(L)$ (expresión [2.93]), a la radiancia del objeto $L^{\text{CN}}(T_{\text{obj}})$ obtenida de la ecuación [2.89]. Reuniendo ambas ecuaciones, llegamos a,

$$T_{\text{obj}} = \frac{B}{\ln\left(\left(\frac{R \cdot \text{Gain}_{\text{cam}}}{\text{ND} - \text{Offset}_{\text{cam}}}\right) + F\right)} \quad [2.94]$$

Es necesario hacer notar que, cuando la fuente emisora no es un cuerpo negro sino un cuerpo cualquiera, la temperatura obtenida será la *temperatura de brillo*, es decir, sin corregir por la emisividad del cuerpo.

Si las distancias son suficientemente largas para que sea importante la atenuación y emisión atmosférica, la temperatura proporcionada por la expresión [2.94], a la que llamaremos *temperatura de brillo aparente*, no será correcta y habrá que hacer correcciones adicionales para tener en cuenta los efectos atmosféricos.

Hasta aquí hemos expuesto como obtener T_{obj} supuestas conocidas Gain_{cam} y $\text{Offset}_{\text{cam}}$, B , R y F . El problema práctico de la calibración de una cámara IR consiste en determinar estos parámetros a partir de medidas experimentales de laboratorio, y se abordará en la sección 4.1.

Finalmente, se muestra a modo de resumen (figura 2.24), un diagrama del proceso que es necesario seguir para obtener la temperatura real del objeto T_{obj} , a partir del ND proporcionado por la cámara IR.

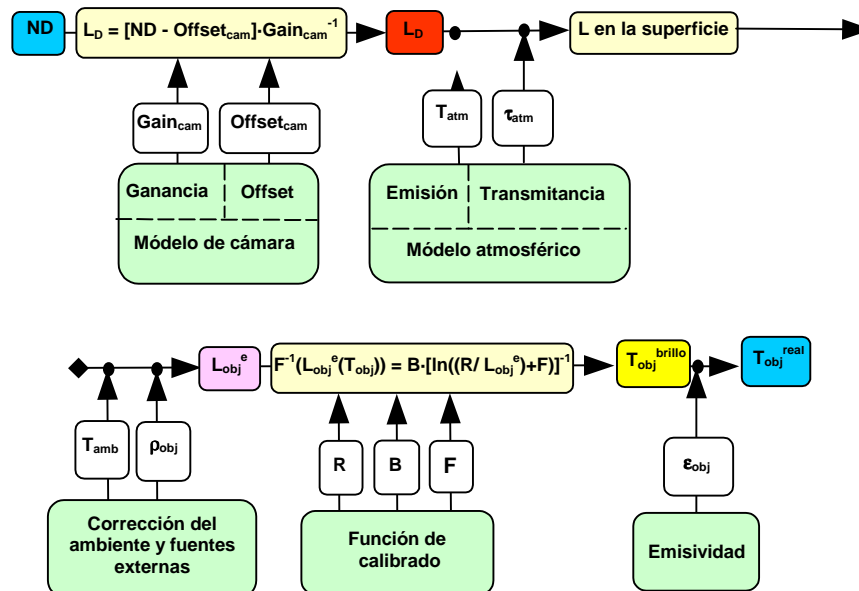


Figura 2.24. – Esquema del proceso de obtención de la temperatura real del objeto a partir del nivel de gris de la imagen.

Capítulo 3

Diseño y realización de un espectrómetro biespectral de imagen en el IR

Como adelantamos en la introducción, para abordar el estudio de fenómenos de marcado carácter espectral es necesario superar los límites de la termografía IR clásica, utilizando al menos, dos bandas espectrales en el infrarrojo. Por esta razón, el primer objetivo de este trabajo ha sido diseñar y construir un *espectrómetro biespectral de imagen en el IR*¹, para lo cual se han utilizado dos cámaras IR que trabajan en las ventanas atmosféricas del infrarrojo medio y térmico.

Los requisitos que debe cumplir un sistema de estas características son muy exigentes (fueron planteados en el capítulo 1) y se desarrollan en la siguiente sección.

3.1. Requisitos del sistema propuesto

Hay que dejar claro, ante todo, que dos cámaras IR no constituyen por sí un espectrómetro de imagen IR, aunque trabajen en bandas distintas. La exigencia es mucho más estricta, y se puede resumir en estos tres requisitos:

- *Correlación temporal.* – Las imágenes deberán ser simultáneas.
- *Correlación espacial.* – Las imágenes deberán ser co-registradas para poder realizar una correspondencia píxel a píxel entre ambas.
- *Correlación radiométrica.* – Las imágenes deberán ser calibradas en temperaturas para que la información de las dos bandas sea comparable.

¹ Este instrumento, será denominado a partir de aquí, por brevedad, simplemente *espectrómetro de imagen IR*, entendiéndose que trabaja en dos bandas espectrales: MIR y TIR.

La consecución de estos tres requisitos, imprescindibles para la construcción del espectrómetro de imagen IR a partir de dos cámaras IR disponibles en el laboratorio, va a condicionar completamente la elección de todos los elementos que lo formarán, tanto mecánicos, como *hardware* y *software*. Estas cámaras, como veremos detalladamente a lo largo de este capítulo, son bastante diferentes en cuanto a su principio de funcionamiento, modo de trabajo e incluso frecuencia de salida de datos, lo que causará algunas complicaciones.

3.1.1. Correlación temporal

La correlación temporal entre las imágenes de ambas bandas es vital para establecer una correspondencia entre su información, sobre todo para el estudio preciso de fenómenos dinámicos, como el fuego, y en general de cualquier proceso térmico transitorio.

El sistema que se propone, por tanto, debe ser capaz en primer lugar de adquirir tanto imágenes como secuencias de ambas cámaras simultánea o cuasi-simultáneamente.

Esta condición de *simultaneidad* plantea, como veremos, requisitos muy restrictivos tanto al hardware como al software, y no puede garantizarse totalmente en nuestro sistema. La causa que impide garantizar la simultaneidad es que la electrónica de cada cámara tiene una frecuencia de trabajo diferente debido a que trabajan con estándares de salida de vídeo compuesto distintos.

3.1.2. Correlación espacial

Para conseguir que las imágenes en las dos bandas estén correlacionadas espacialmente, es necesario en primer lugar, un *apuntamiento óptico* óptimo para el centrado de sus campos de visión. Además, dado que las cámaras utilizadas tienen campos de visión y tamaños de array diferentes, este requisito no basta, y será necesario un procesado posterior denominado en teledetección *co-registración* [Schowengerdt 97]. La aplicación de los algoritmos que realizan este tipo de procesado (capítulo 4), permite obtener una correspondencia espacial *píxel a píxel* entre las imágenes de ambas bandas espectrales, de manera que el píxel (i',j') de la imagen en el infrarrojo térmico tendrá el mismo IFOV que el píxel (i,j) de la imagen del infrarrojo medio (que se utiliza

como base para la co-registración) y ambos corresponderán al mismo punto de la escena IR.

3.1.3. Correlación radiométrica

Para poder correlacionar la información obtenida en dos bandas espectrales diferentes, es necesario que esta información represente realmente una magnitud comparable, como la radiancia o temperatura. Por lo tanto las imágenes deberán estar *calibradas radiométricamente*. Esta correlación deberá ser, como mínimo, relativa (es decir, de una cámara respecto de la otra), pero lo ideal es que sea absoluta (es decir, respecto de un estándar radiométrico).

La calibración radiométrica de las imágenes exige dos requisitos diferentes al sistema propuesto. En primer lugar, las imágenes que debemos adquirir no deben haber sufrido ninguna modificación para su visualización: deben contener exactamente la información relativa a la radiación detectada de la escena que se trate. Por otra parte, será necesario realizar un calibrado previo de las cámaras (capítulo 4) y también con los filtros y diafragmas que utilizaremos para atenuar la radiación incidente, a fin de ampliar el rango de medida.

Es necesario señalar que en muchas condiciones de medida es imprescindible utilizar una *cámara en el visible* para realizar el apuntamiento, sobre todo cuando queremos medir fenómenos de alta temperatura, como por ejemplo el fuego, donde las cámaras IR deben atenuarse para evitar la saturación. Esto impide apuntar con ellas, al no detectar nada a temperatura ambiente. Por otra parte, la incorporación de una cámara en una banda espectral adicional tiene un interés intrínseco porque la información recogida en nuestras medidas será mayor, aun cuando sus imágenes no sean simultáneas ni co-registradas. Además, será necesario disponer de un sistema de visualización para el control y monitorización de las medidas, que permita, entre otras funciones, ver el encuadre y el enfoque de cada una de las cámaras.

Si cumplimos estos requisitos, se puede decir que disponemos de un espectrómetro biespectral de imagen IR para trabajar en laboratorio, que nos permitirá utilizar técnicas de procesamiento punto a punto en las dos bandas IR. No obstante, pretendemos utilizar este sistema para realizar también medidas de campo y aerotransportadas.

La estrategia seguida en el diseño del sistema propuesto ha sido realizar en primer lugar un sistema capaz de trabajar en laboratorio con las especificaciones exigidas, luego dotarlo de la autonomía necesaria para realizar medidas de campo, y finalmente adaptarlo para su utilización embarcado en un helicóptero. Los requisitos adicionales para trabajar en estas nuevas condiciones son:

- Autonomía para realizar medidas de campo fuera del laboratorio. Portabilidad, reducción de peso y de consumo energético.
- Adecuación para su ubicación en un helicóptero, incluyendo el aislamiento de las vibraciones y la obtención de la potencia necesaria a bordo del helicóptero.

3.2. Componentes del espectrómetro de imagen IR

Los elementos básicos que componen el espectrómetro de imagen IR propuesto son: el sistema óptico formado por las cámaras en el infrarrojo medio y térmico, la cámara visible para apuntamiento; el sistema de adquisición de imágenes IR; el sistema mecánico de soporte y apuntamiento; y el sistema de visualización para el control de la adquisición de imágenes.

El espectrómetro de imagen se basa en *dos cámaras IR*, cuyas características principales son muy diferentes. En el capítulo 2 se vio que en general los detectores empleados en cada una de las ventanas atmosféricas suelen ser distintos. En nuestro caso el detector empleado en la cámara MIR es de tipo cuántico (InSb) mientras que el de la cámara TIR es de tipo térmico (microbolómetros de VO_x). Esto conlleva algunas otras diferencias entre ambas cámaras como la necesidad de refrigeración o no, consumo y peso diferente, etc. En cambio otras diferencias, como el tamaño del detector o el número F, responden a aspectos del diseño de las mismas. En la tabla 3.2 se pueden comparar las principales especificaciones de ambas cámaras.

No obstante, las cámaras no constituirían un espectrómetro de imagen IR sin el sistema de adquisición, que como veremos más en detalle, permite la adquisición simultánea o cuasi-simultánea de imágenes digitales MIR y TIR. Este sistema ha sido diseñado “a medida” para las dos cámaras disponibles en el laboratorio, pero su adaptación a otras cámaras en estas bandas sería relativamente sencilla.

A continuación expondremos con detalle las características de los elementos que constituyen el sistema propuesto. La descripción de las cámaras IR se hará atendiendo a

los diferentes subsistemas que las forman: óptica, detector y electrónica, para finalmente explicar su funcionamiento.

3.2.1. Cámara de infrarrojo medio: Amber Radiance 1t

Es necesario reseñar en primer lugar que esta cámara es un diseño intermedio entre dos modelos anteriores desarrollados por el fabricante: Radiance 1 (una cámara de laboratorio) dotada de múltiples salidas de vídeo y datos [Radiance 1 93]; y Radiance PM diseñada para su utilización en mantenimiento predictivo, y por ello portátil y dotada de termografía [Radiance PM]. Por esta razón, las referencias indicadas aluden a los manuales de estas dos cámaras y no al del modelo Radiance 1t, que no ha sido editado, (sólo tenemos información comercial de sus especificaciones [website 10]).

Esta cámara IR tiene dos importantes características desde el punto de vista radiométrico. En primer lugar, su elevado rango dinámico, debido al conversor analógico digital de 12 bits, que proporciona por tanto imágenes IR con $2^{12} = 4096$ niveles de gris. En segundo lugar, la posibilidad de seleccionar el tiempo de integración de los detectores (tiempo de exposición) de 0 a 20 ms. La cámara tiene por defecto tres tiempos de integración preseleccionados ($t_1 = 1.249$ ms, $t_2 = 0.469$ ms y $t_3 = 0.157$ ms) que permiten medir temperaturas desde -20 a 160 °C. Este intervalo de medida de temperatura es ampliable mediante la utilización de filtros interferenciales neutros o selectivos pudiendo llegar a medir temperaturas de hasta 1200 °C. En la tabla 3.1, se indican los filtros disponibles y el intervalo de temperaturas que es posible conseguir mediante su utilización. La transmitancia de los filtros neutros (ND1 y ND2) se indica en la tabla. El filtro *Flame*, es un filtro interferencial selectivo, cuyo máximo se encuentra centrado fuera de la banda de emisión del CO_2 , permitiendo la medida de altas temperaturas incluso en presencia de llamas.

Filtro	Transmitancia	Intervalo de Temperaturas
–	100 %	-20 – 160 °C
ND1	10 %	160 – 300 °C
ND2	1 %	300 – 500 °C
Flame	Selectivo	500 – 1200 °C

Tabla 3.1 – Intervalos de medida de temperaturas de la cámara Amber Radiance 1t.

En el trabajo que desarrollaremos hemos necesitado ampliar estos intervalos de temperatura mediante el uso de diafragmas calibrados, como se describe en el capítulo 4.

Óptica

La óptica de la cámara es intercambiable, pero habitualmente ha sido utilizada con una lente de Si:Ge, cuya distancia focal es $f = 50$ mm y su número F, $F/\# = 2.3$, siendo el diámetro de su pupila de entrada $D_{pe} = 21.7$ mm. Utilizando esta lente el campo de visión, FOV, es de $11.2^\circ \times 11.2^\circ$, y el campo de visión instantáneo para cada píxel, IFOV², es de 0.76 mrad.

La selectividad espectral para trabajar en la ventana atmosférica de 3 a 5 μm se logra mediante un filtro interferencial paso banda sobre sustrato de zafiro. Este filtro está colocado delante del detector y dentro del criostato (“filtro frío”), como se puede observar en el esquema de la figura 3.1 (izquierda). La ventana del criostato, así como las lentes de silicio-germanio (Si:Ge) utilizadas en la misma, están dotadas de recubrimientos multicapa específicos para lograr la máxima transmisión de la óptica y a la vez reducir las pérdidas por reflexión de la radiación incidente.

Detector

El detector que incorpora esta cámara es un *array de plano focal*, FPA. Como se explicó en el apartado 2.4.1, los FPAs presentan grandes ventajas frente a los monodetectores o *arrays* lineales al no requerir partes móviles ni elementos mecánicos, haciendo posible una cámara mucho más robusta (figura 3.1). A cambio, como se verá más adelante, la puesta en funcionamiento es más compleja al tener que realizar una homogeneización de la respuesta de todos los detectores.

Este FPA está construido utilizando *técnicas de hibridación* y consta de una matriz de 256x256 elementos de antimonio de indio, InSb, operando en modo fotovoltaico, y un circuito integrado de silicio como electrónica de lectura. Los detectores y el circuito tienen la misma geometría, y la conexión entre ellos se realiza mediante soldadura con gotas de indio (*indium bump hybridization*). El último paso en el proceso de hibridación consiste en eliminar el sustrato del detector de manera que

² De la expresión [2.29] $\text{IFOV} = \frac{\text{tamaño de píxel}}{f} = \frac{38 \cdot 10^{-6}}{50 \cdot 10^{-3}} = 0.76 \text{ mrad}$, ver tabla 3.2.

este pueda ser iluminado desde la parte posterior [Radiance 1 93]. El tamaño de cada píxel es de $38 \times 38 \mu\text{m}$ y la distancia entre centros de detectores contiguos (*píxel pitch*) es de $38 \mu\text{m}$. El *array* empleado es un *full focal plane array*, un FPA cuyo factor de llenado (*fill factor*) es del 100 %, es decir, coincide el tamaño de píxel y la distancia entre sus centros [Holst 00].

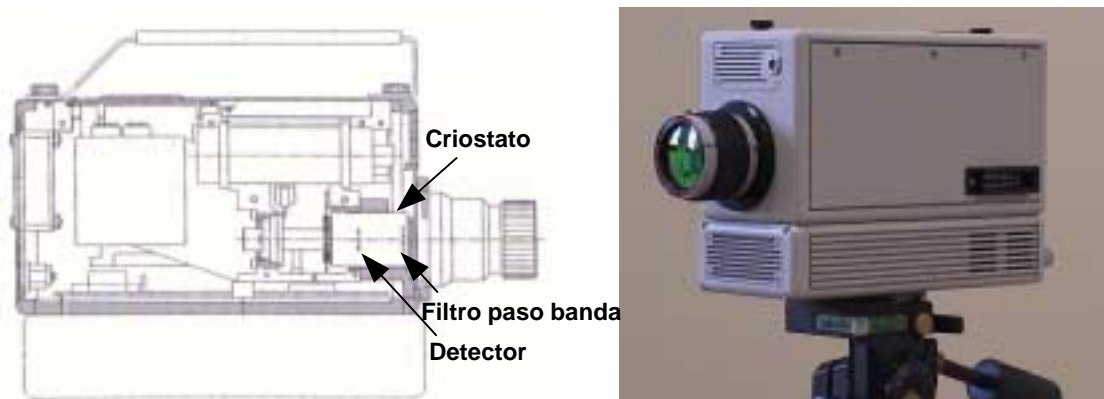


Figura 3.1 – Esquema de la cámara Amber Radiance 1t donde se puede observar el criostato, el detector y el filtro frío paso banda (izquierda). Fotografía de la cámara (derecha).

La temperatura óptima de trabajo del detector es de 70 a 80 K, y se consigue mediante un ciclo cerrado de refrigeración Stirling lineal y colocando el detector en un criostato de dedo frío, como se puede observar en la figura 3.1 (izquierda). Una de las principales características de los detectores de InSb fotovoltaicos es su alta detectividad, $D^* > 2 \cdot 10^{11} \text{ cm Hz}^{1/2} / \text{W} @ 80 \text{ K}$ (que además es bastante uniforme en la ventana de $3 - 5 \mu\text{m}$, figura 2.14), siendo su NETD inferior a $25 \text{ mK} @ 300 \text{ K}$ [Radiance 1 93][website 10].

Electrónica

La cámara dispone de dos salidas, una de vídeo compuesto y otra de datos. La salida de video compuesto utiliza el estándar europeo PAL/CCIR, y permite visualizar las imágenes en un monitor externo. La salida de datos, denominada *High Speed Video Bus* (HSVB), utiliza el estándar de transmisión de datos en modo diferencial RS-422 a través de un puerto paralelo, ofreciendo una transferencia de 50 imágenes por segundo. Esta salida, será de gran utilidad para el desarrollo del trabajo que aquí se presenta, permitiendo acceder a la señal digital de 12 bits procedente de cada píxel del FPA.

Puesta en funcionamiento de la cámara Amber Radiance 1t

Para su correcta operación la cámara realiza, de manera automática, una serie de procesos tras el encendido.

En primer lugar, se debe alcanzar la temperatura de trabajo óptima del detector, para lo cual el refrigerador Stirling emplea unos 10 minutos.

En segundo lugar, se uniformiza la respuesta de los elementos del FPA para que su señal de salida sea idéntica para una misma intensidad de radiación incidente. En este proceso, denominado *normalización del FPA*, se expone el *array* ante una fuente de radiación interna, extensa y uniforme, consistente en una placa metálica que abarca todo el *array* y cuya temperatura es controlada mediante un dispositivo termoeléctrico. La normalización se puede realizar a uno o a dos puntos, atendiendo a si son una o dos temperaturas de la fuente a las que se expone el *array*.

Esta cámara realiza de manera automática tras el encendido la *normalización a dos puntos*, más precisa, fijando la fuente a una temperatura “fría”, por debajo de la temperatura ambiente (en torno a unos 15 °C) y a otra “caliente”, superior al ambiente (en torno a unos 45 °C). El ajuste de la respuesta de los detectores se realiza mediante una *tabla de corrección de no uniformidades*, denominada en inglés *Non-Uniformity Correction* (NUC), que contiene coeficientes de ganancia y *offset* (o nivel de cero) para cada uno de los elementos del FPA, para un tiempo de integración dado. Al comienzo del proceso de normalización, la tabla NUC se inicializa fijando la ganancia de cada píxel a 1 y su *offset* a cero y se eliminan los “píxeles malos”, es decir, aquellos que no responden correctamente, por el promedio del valor de los píxeles más próximos. A continuación se expone el detector a la fuente de radiación interna a la temperatura fría y después a la caliente, tomándose 16 imágenes y realizándose un promedio en cada caso. Los valores de ganancia y *offset* de cada uno de los píxeles se ajustan para que la salida de todos ellos sea la misma. La duración de este proceso de normalización del FPA es de unos 50 segundos, quedando la cámara totalmente operativa.

La cámara dispone de cuatro tablas NUC, de las cuales tres de ellas se utilizan con los tiempos de integración prefijados, mientras que la cuarta se deja libre para el usuario. No obstante, es posible acceder a los parámetros de normalización de las NUC para cambiarlos mediante una aplicación instalada en un PC y conectada a la cámara a través de un puerto serie con el protocolo de comunicación RS-232.

La figura 3.2 muestra un diagrama de bloques en el que se esquematiza el funcionamiento de la cámara. Se puede apreciar el conversor analógico-digital de 12

bits, que digitaliza la señal analógica procedente del FPA. La salida del conversor es ajustada mediante la tabla NUC correspondiente al tiempo de integración utilizado. La señal a la salida de la NUC, por una parte, se envía al puerto HSVB (ésta será la señal utilizada en este trabajo), y por otra parte, se convierte en vídeo compuesto para ser visualizada en un monitor externo. En el esquema se aprecia que esta señal, antes de ser transformada en vídeo, es ajustada mediante un *offset* y ganancia globales, a través de un *control de ganancia automática* (AGC) aplicado a una *región de interés* (ROI) que se corresponde con la zona central de la imagen. Este ajuste sirve para mejorar el contraste de la imagen pero, debido a su carácter variable y automático hace que se pierda su información radiométrica. La señal afectada por el AGC es convertida a vídeo analógico y pasada a través de un LUT (*Look-up table*) donde se aplica una paleta de niveles de gris o de falso color antes de ser convertida en vídeo compuesto y quedar accesible para su visualización.

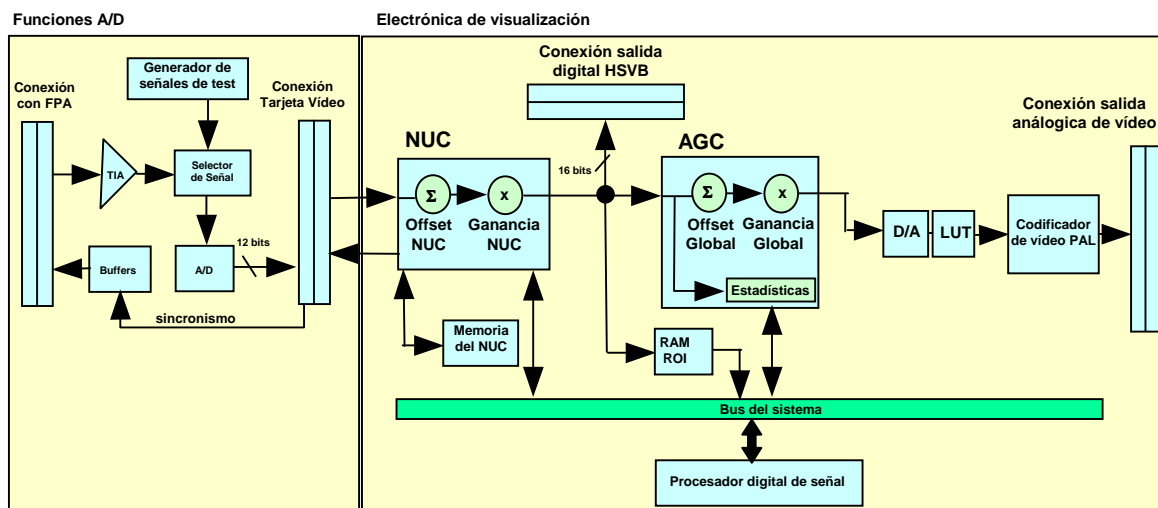


Figura 3.2 – Diagrama de bloques esquematizado en el que se muestra el flujo de señal de la cámara Amber Radiance 1t (adaptada de [Radiance 93]).

3.2.2. Cámara de infrarrojo térmico: Amber Sentinel

Cuando comenzó su comercialización para fines no militares (en torno al año 1996 en el mercado norteamericano) fue la primera cámara en el infrarrojo térmico que funcionaba sin refrigeración, salvo un dispositivo Peltier de estabilización del detector. Además, hay que destacar que es totalmente portátil, dotada de un visor y capaz de funcionar con pequeñas baterías de gran autonomía (figura 3.3). La cámara es silenciosa al no utilizar refrigeración y además cumple estándares militares sobre estanqueidad y vibraciones para trabajar en entornos hostiles [Sentinel 96], mucho más estrictos que los

civiles. Se trata de una cámara de termovisión, orientada principalmente para fines militares y de vigilancia más que para propósitos científicos. No obstante, veremos que un trabajo adicional ha permitido adecuar esta cámara para realizar radiometría y lograr los objetivos propuestos en este trabajo.

Óptica

La lente de la cámara es de Ge y tiene una distancia focal, $f = 50$ mm y un número F , $F/\# = 0.7$, siendo el diámetro de su pupila de entrada $D_{pe} = 71.4$ mm, proporcionando un campo de visión total (FOV) de 13.5° en vertical y 18.2° en horizontal (debido a las dimensiones del *array*). El campo de visión instantáneo³ (IFOV) es de 1.0 mrad en ambas dimensiones. Esta lente no es intercambiable por características de fabricación para cumplir normas militares de estanqueidad. La lente y la ventana del detector tienen un recubrimiento multicapa que hace de filtro paso banda. De este modo se consigue que la banda de trabajo sea de 8 a 12 μm utilizando un detector térmico, cuya respuesta espectral es plana (figura 2.14).



Figura 3.3. – Cámara Amber Sentinel + Digital Interface Unit (DIU).

Detector

Esta cámara utiliza un FPA constituido por 320x240 microbolómetros de óxido de vanadio, VO_x . El tamaño de cada píxel es de $50 \times 50 \mu\text{m}$ y la distancia entre centro de detectores (*pixel pitch*) es de $50 \mu\text{m}$. Por tanto, este *array* también es un *full focal plane array*. Su detectividad específica es $D^* > 5 \cdot 10^8 \text{ cm Hz}^{1/2} / \text{W}$ y su NETD inferior a

³ De la expresión [2.29] $\text{IFOV} = \frac{\text{tamaño de píxel}}{f} = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{50 \cdot 10^{-3}} = 1.0 \text{ mrad}$, ver tabla 3.2.

100 mK @ 298 K, siendo su temperatura nominal de trabajo de 298 K [Meyer 91][Radford 96a][Radford 96b][Marshall 96]. El detector está térmicamente estabilizado mediante un dispositivo termoelectrico y situado dentro de un criostato, para aislarlo de las condiciones ambientales y hacer que su estabilización térmica sea mucho más eficiente.

El FPA de microbolómetros sin refrigerar fue desarrollado por Honeywell. La arquitectura en micropuente de cada píxel (figura 3.4 izquierda) se realiza sobre un sustrato de silicio que compone el circuito integrado de la electrónica de lectura, formando así un FPA monolítico, a diferencia del híbrido utilizado en la cámara de infrarrojo medio. La estructura puente está constituida por nitruro de silicio, Si_3N_4 , que actúa también como aislante térmico entre el microbolómetro y el sustrato, y en su centro se deposita una fina capa de óxido de vanadio policristalino, VO_x , de unos 500 Å de espesor, que constituye el detector. Este detector variará su resistencia en función de la radiación que sobre él incida [Meyer 91][Radford 96a].

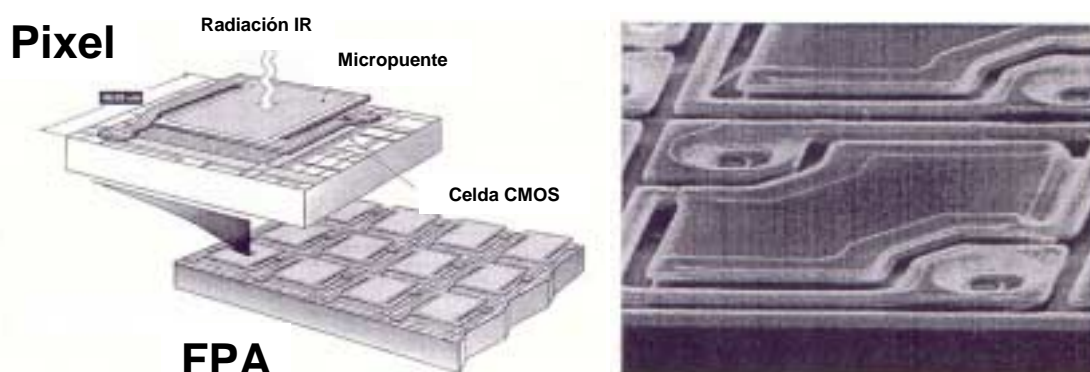


Figura 3.4. – Arquitectura en micropuente del FPA de la cámara Amber Sentinel (izquierda) e imagen de microscopio de un píxel del FPA (derecha) (adaptada de [Marshall 96]).

Electrónica

Es posible acceder a los controles de la cámara a través de su puerto serie mediante el protocolo RS-232 de comunicaciones. La única salida de datos que posee es una de vídeo compuesto utilizando el estándar norteamericano para blanco y negro, el RS-170.

Para tener acceso a los datos digitales antes de su conversión a vídeo compuesto necesitamos incorporar a la cámara un dispositivo adicional denominado *Digital Interface Unit* (DIU) (figura 3.3). Mediante ese dispositivo es posible acceder a los datos digitales una vez corregidos por la NUC, a través de un puerto HSVB (figura 3.5) que permite una transferencia de 30 imágenes por segundo, utilizando el protocolo de

transferencia de datos RS-422. El rango dinámico del conversor analógico digital de esta cámara también es de 12 bits y por tanto sus imágenes son de 4096 niveles de gris.

Puesta en funcionamiento de la cámara Amber Sentinel

A diferencia de la cámara anterior, no se realiza una normalización a dos puntos para uniformizar la respuesta de los detectores con cada puesta en marcha. Este hecho, junto con la utilización de una matriz de microbolómetros sin refrigerar, hace que la cámara esté operativa en sólo dos minutos, tiempo necesario para estabilizar la temperatura del detector. La cámara almacena en una memoria los *offsets* y ganancias de la tabla NUC obtenida en una normalización a dos puntos realizada en fábrica. No obstante, es posible ajustar el *offset* de cada detector en cualquier momento mediante una normalización a un punto. En este proceso se coloca una placa metálica a una determinada temperatura (controlada por el dispositivo termoelectrico) delante del detector y el microprocesador incorporado en la electrónica de la cámara uniformiza la respuesta reajustando el *offset* para cada píxel, pero no su ganancia.

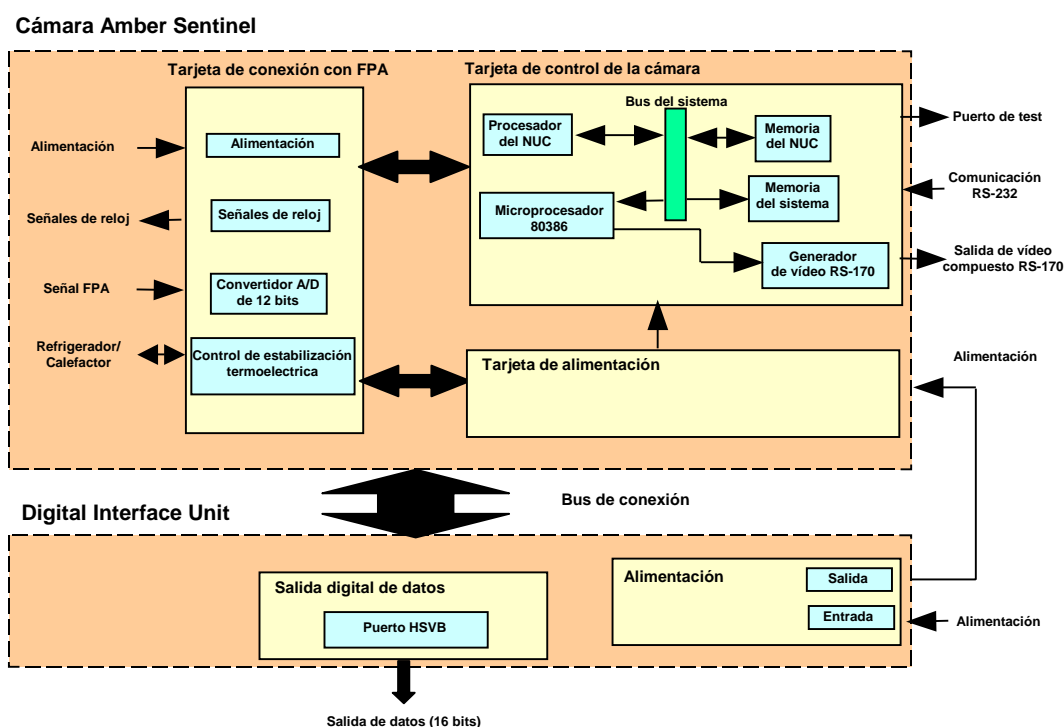


Figura 3.5. – Diagrama de bloques esquematizado de la electrónica y el flujo de información de la cámara Amber Sentinel + DIU (adaptada de [Meyer 91]).

En la figura 3.5 se muestra un diagrama de bloques simplificado de la electrónica de esta cámara junto con el DIU, donde se observa el flujo de la señal y los puertos de comunicación y de salida de datos.

En la tabla 3.2 y a modo de resumen se pueden observar las características más importantes de las dos cámaras utilizadas para la construcción del espectrómetro biespectral de imagen IR.

Especificaciones	Amber Radiance 1t	Amber Sentinel + DIU
Detector	InSb	Micróbolómetros VO _x
Número de píxeles	256x256 (65536)	320x240 (76800)
Tamaño de píxel	38x38 µm	50x50 µm
Pixel pitch	38 µm	50 µm
Respuesta espectral	3 – 5 µm	8 – 12 µm
Refrigeración	Ciclo Stirling lineal	Estabilización termoeléctrica
NEDT	< 0.025 K @ 300 K	< 0.1 K @ 298 K
Temp. del detector	70 – 80 K	298 K
Detectividad	$D^* > 2 \cdot 10^{11} \text{ cm Hz}^{1/2} / \text{W @ 80 K}$	$D^* > 5 \cdot 10^8 \text{ cm Hz}^{1/2} / \text{W @ 298 K}$
Rango dinámico	12 bits	12 bits
Frame rate	50 fps	30 fps
Salida de video	PAL/CCIR	RS-170
Salida digital	HSVB (RS-422 @ 3.44 MHz)	HSVB (RS-422 @ 3.068 MHz)
Distancia focal (f)	50 mm	50 mm
Número F (F#)	2.3	0.7
Pupila de entrada (D _{pe})	21.7 mm	71.4 mm
FOV	11.2° x 11.2°	13.5° V x 18.2° H
IFOV	0.76 mrad	1.0 mrad
Potencia nominal	40 W	6 W
Peso	4.5 kg	3 kg
Dimensiones	112x183x262 mm	160x105x283 mm

Tabla 3.2. - Características principales de las cámaras IR utilizadas en el montaje experimental

3.2.3. Cámara Visible: SONY DCR-TRV20E

Como se indicó al principio del capítulo es muy útil, a veces imprescindible, disponer de una cámara en el visible para apuntar el espectrómetro de imagen IR en medidas de campo, especialmente cuando es necesario utilizar una gran atenuación en las cámaras IR. Esta cámara sirve también para realizar un registro en el visible, y también en audio, de las circunstancias acaecidas durante la medida. Esta información será muy útil para la gestión de la gran cantidad de imágenes almacenadas en una sesión de medida con el espectrómetro de imagen IR.



Figura 3.6. – Cámara visible SONY DCR-TRV20E empleada para apuntamiento y grabación.

Especificaciones	SONY DCR-TRV20E
Dispositivo de imagen	CCD tipo $\frac{1}{4}$
Número de píxeles	1.070.000
Distancia focal (f)	4.2 – 42 mm
Pupila de entrada (D_{pe})	37 mm
Número F (F/#)	1.8
Iluminación mínima	7 luxes (F/# 1.8)
	0 luxes (<i>NightShot</i>) ⁴
Grabación digital	Mini DV
Memoria	64 Mbytes
Salida de vídeo compuesto	PAL
Salida de vídeo digital	iDV (IEEE-1394)
Consumo medio	4.4 W
Peso (incluida batería)	0.780 kg
Dimensiones	71x93x170 mm

Tabla 3.3. – Características de la cámara de visible SONY DCR-TRV 20E [SONY 00].

Por tanto, la cámara elegida para proporcionar estas funciones deberá cumplir los siguientes requisitos:

- Campo de visión mayor que las cámaras IR.
- Dimensiones y peso reducido.
- Pantalla de visualización.
- Grabación de imágenes digitales.
- Grabación de vídeo digital con sonido (útil para llevar un registro de la sesión de medidas).

⁴ Dispone de un pequeño foco, de corto alcance, para poder captar imágenes en infrarrojo próximo (NIR) en condiciones de baja o nula visibilidad.

- Autonomía total en cuanto a alimentación y a grabación de imágenes y secuencias.

Pero debemos destacar que no exigimos que las imágenes en el visible sean calibradas radiométricamente ni simultáneas con las infrarrojas. La cámara visible es, pues, un elemento auxiliar que no está integrado en el espectrómetro de imagen.

Una cámara que cumplía todos estos requisitos fue la SONY DCR-TRV20E (figura 3.6) cuyas características se resumen en la tabla 3.3.

3.2.4. Sistema de adquisición de imágenes IR

En este apartado se abordará la elección del hardware y software adecuados para conseguir los objetivos indicados al inicio del capítulo. El sistema de adquisición debe ser capaz de adquirir simultáneamente imágenes procedentes de dos cámaras IR en dos bandas espectrales diferentes, MIR y TIR. Estas imágenes deben ser susceptibles de calibración radiométrica, haciendo uso de todo el rango dinámico de las cámaras, y deben poder ser correlacionadas espacialmente *a posteriori*, (como veremos en el siguiente capítulo). Estos requisitos son los que definen el espectrómetro de imagen IR y por esta razón podría decirse que el sistema de adquisición es su “alma”, ya que el cambio de unas cámaras por otras sería asumible sin grandes dificultades.

Como hemos visto en secciones precedentes ambas cámaras IR suministran imágenes a través de dos tipos de salidas: una analógica de vídeo compuesto y otra digital de 12 bits con el protocolo RS-422. En primer lugar, deberemos analizar la idoneidad de cada una de ellas para alcanzar los objetivos propuestos. En función de este estudio se elegirá el hardware y software necesario para su adquisición.

Vídeo compuesto

Usar la señal de vídeo compuesto es la opción más sencilla y económica. En aplicaciones de visión artificial es habitual trabajar con esta señal y digitalizarla con una tarjeta de adquisición adecuada. Esa fue la opción que se adoptó en una etapa inicial, usando una tarjeta *Data Translation* modelo DT-3152 [DT3152 98], cuyas características principales se resumen en el Apéndice A. El control de la adquisición de las imágenes se llevó a cabo mediante el software propio de la tarjeta y también con un software más completo, capaz además de realizar procesamiento de imágenes, denominado WiT [WiT 97].

La tabla 3.2 refleja que la señal de vídeo compuesto de ambas cámaras es diferente. La cámara MIR utiliza el sistema europeo PAL/CCIR (color/blanco y negro @ 25 Hz) en el que cada imagen está constituida por 768 píxeles de ancho por 576 de alto y cuya velocidad de transferencia de imágenes es de 25 imágenes por segundo. La cámara TIR utiliza el sistema de vídeo norteamericano RS-170 (blanco y negro @ 30 Hz), en el que el tamaño de la imagen es de 640x480 píxeles y la velocidad de transferencia de 30 imágenes por segundo. Pronto quedó claro que el uso de las imágenes de vídeo compuesto presenta una serie de inconvenientes de diversa índole:

- *Modificación del tamaño de la imagen.* – El tamaño de la imagen de vídeo es mayor que el de los *arrays* de detectores, de manera que la imagen sufre una conversión que modifica la información radiométrica de cada detector.
- *Efecto del control de ganancia automática (AGC).* – Como hemos visto, antes de transformar la señal de los detectores en vídeo compuesto, se le aplica, para mejorar su contraste, una ganancia y *offset* globales calculados por el AGC de manera automática teniendo en cuenta la parte central de la escena IR en cuestión. Con esto mejora la visualización de la imagen, pero se distorsiona radiométricamente la señal obtenida por el detector, ya que ganancia y *offset* son desconocidos y variables con el tiempo en función de la escena IR.
- *Transformaciones sucesivas de la información.* – En casi todas las aplicaciones las imágenes han de ser procesadas digitalmente. Por lo tanto, si utilizamos la señal de vídeo compuesto, que es analógica, necesitaremos digitalizarla de nuevo para poder procesarla. Esta digitalización puede realizarse en un ordenador mediante una tarjeta de adquisición de imágenes (*frame grabber*), pero esta operación presenta varios inconvenientes:
 - Se digitaliza una imagen que ya era digital a la salida de la NUC dentro de la cámara. La nueva digitalización supone una pérdida de resolución radiométrica y un desaprovechamiento del rango dinámico del conversor AD de las cámaras: en el momento de comenzar este trabajo, las tarjetas de adquisición de vídeo compuesto tenían un conversor analógico-digital de 8 bits, pasando posteriormente a ser de 10 bits, mientras que la cámara ya proporciona un rango dinámico de 12 bits.
 - A pesar de esta peor resolución radiométrica, el tamaño de cada imagen de video compuesto digitalizada en 8 bits, es mucho mayor que el de las imágenes que se adquieren a través de la salida digital de datos. Una

- imagen CCIR digitalizada en 8 bits ocupa $768 \times 576 \times 1 \text{ byte} = 442.368$ bytes, y una RS-170, $640 \times 480 \times 1 \text{ byte} = 307.200$ bytes (mientras que el tamaño de las imágenes digitales adquiridas a través del HSVB sería: 131.071 bytes para la imagen MIR y 151.040 bytes para la TIR). Esto hace que la cantidad de memoria RAM necesaria para la adquisición de este tipo de imágenes deba ser muy grande.
- Las señales analógicas son muy susceptibles al ruido electrónico, pudiéndose distorsionar la información que contienen.

Salida digital

La salida digital proporcionada por ambas cámaras utiliza el mismo estándar de comunicación, el RS-422, pero debido a la utilización de una frecuencia de trabajo diferente en cada cámara la velocidad de transferencia de imágenes es distinta: 50 imágenes por segundo en la cámara MIR y 30 en la TIR.

Recordemos, que la salida digital contiene la información de la salida directa de las NUC y se accede a través del puerto HSVB de la cámara MIR y del DIU que acoplamos a la cámara TIR.

Las ventajas que aporta utilizar las imágenes proporcionadas por esta salida, frente a las de vídeo compuesto, son las siguientes:

- Cada píxel de la imagen es la señal correspondiente a un píxel de la matriz de detectores.
- La señal no sufre ninguna transformación dentro de la cámara excepto su digitalización.
- No hay pérdida de rango dinámico y por tanto de resolución radiométrica, ya que se aprovechan los 12 bits del conversor analógico-digital de las cámaras.
- La señal que se extrae de la cámara es prácticamente inmune al ruido electrónico, al tratarse de una señal digital que, además, utiliza el estándar RS-422 que trabaja en modo diferencial.
- El tamaño de las imágenes es considerablemente menor a pesar de necesitar dos bytes por píxel. El tamaño de una imagen MIR es de $256 \times 256 \times 2 \text{ bytes} = 131.072$ bytes y el de una imagen TIR $320 \times 236 \times 2 \text{ bytes} = 151.040$ bytes.

Estas ventajas, especialmente importantes teniendo en cuenta los requisitos de simultaneidad y calibración que debe cumplir el sistema de adquisición, motivaron la decisión de trabajar con la salida digital de imágenes.

En el siguiente subapartado se detallan cuales han sido las tarjetas de adquisición de imágenes y las aplicaciones informáticas utilizadas para el control de las mismas y el almacenamiento de las imágenes.

Configuración del sistema de adquisición

La adquisición de imágenes digitales de 12 bits a través de un protocolo de transmisión RS-422, exige que la tarjeta de adquisición utilizada sea compatible con dicha salida y tenga al menos una entrada de datos de 16 bits, ya que las imágenes necesitan 2 bytes por píxel para su adquisición.

Se comenzó a trabajar con una tarjeta de *Imaging Technology*, modelo IM-PCI [IM-PCI 95] cuyas características se resumen en el Apéndice A. Esta tarjeta fue el punto de partida natural, porque estaba disponible en el laboratorio; sin embargo, se presentaron varias dificultades al trabajar con ella:

- No se disponía de los ficheros de configuración adecuados para comunicar las cámaras con la tarjeta, por lo que la adquisición de las imágenes no era la correcta.
- No era posible la visualización de estas imágenes de 12 bits durante la adquisición.

Se desarrollaron los ficheros de configuración específicos para cada una de las cámaras y también una aplicación en C++ capaz de adquirir y visualizar correctamente las imágenes, pero este sistema instalado en un ordenador convencional (es decir, con un bus de datos y un microprocesador) sólo permitía adquirir imágenes con una cámara y una tarjeta. Para poder adquirir imágenes simultáneas de las dos cámaras se estudiaron varias posibilidades:

- El desarrollo de una aplicación específica capaz de gestionar la adquisición simultánea con dos de estas tarjetas en un ordenador convencional.
- Utilización de un ordenador con dos buses de datos independientes y dos microprocesadores.
- Estudio de las características de otras tarjetas de adquisición de imágenes con entrada digital del tipo RS-422 de 16 bits disponibles en el mercado.

Como resultado de este estudio se llegó a la conclusión de que la mejor solución para lograr el objetivo propuesto era utilizar dos tarjetas de *BitFlow* [website 11], modelo *Road Runner* [Road Runner 96] cuyas características se resumen en el Apéndice A, gestionadas mediante la aplicación *Video Savant* [Video Savant 99] de IO Industries [website 12] (figura 3.7). Las prestaciones que esta configuración permite son las siguientes:

- Los ficheros de configuración para nuestras cámaras han sido desarrollados por el fabricante.
- Adquisición, en principio, tanto independiente como simultáneamente de imágenes de las cámaras con un ordenador convencional.
- Visualización de las imágenes durante la adquisición.
- Posibilidad de ampliación de las capacidades del software mediante la utilización de librerías de desarrollo propias SDK (*Software Development Kit*).

Una vez seleccionadas las tarjetas y la aplicación que las gestiona, los siguientes pasos por realizar son:

- Instalación y configuración de las tarjetas.
- Diseño y realización de los cables que comunican las cámaras con las tarjetas.
- Instalación y configuración del software para:
 - Controlar la adquisición con dichas tarjetas, tanto independiente como simultáneamente.
 - Comprobar que el software permite grabar tanto imágenes como secuencias, primero con una sola cámara y luego utilizando las dos.

Hay que señalar que para utilizar esta configuración en el sistema de adquisición, los requisitos que debe cumplir el ordenador donde se instale son bastante estrictos y prácticamente obligaron a diseñar el ordenador a medida:

- Sistema operativo Windows NT.
- Selección de la placa base y tarjeta gráfica de altas prestaciones y compatibles con las tarjetas de adquisición.
- El ordenador debe tener mucha memoria RAM, ya que la adquisición se realiza inicialmente en ella, almacenándose posteriormente en el disco duro.

En esta fase de configuración del sistema aparecieron numerosos problemas de compatibilidad de componentes, y en particular de solicitud de interrupciones. Lógicamente las mayores dificultades, las planteó el requisito de adquisición simultánea de imágenes de ambas cámaras, por los siguientes motivos:

- El tamaño de las imágenes de cada cámara es diferente, 320x240 píxeles las TIR y 256x256 píxeles la MIR.
- La velocidad de transferencia de imágenes es diferente para cada cámara, 30 imágenes por segundo para la TIR y 50 imágenes por segundo para la MIR.

La solución de estos dos problemas fue:

- Para la adquisición simultánea con ambas tarjetas, comprobamos que siempre es necesario conectar la cámara TIR a la primera tarjeta debido a que la aplicación utilizada fija la anchura de los *buffers* de memoria RAM (no la altura), en los que se almacenarán las imágenes adquiridas. La información sobre el ancho de la imagen se encuentra en el fichero de configuración de dicha cámara seleccionado para la primera tarjeta. Dado que las imágenes de la cámara TIR tienen mayor anchura, es ésta la que se debe conectar a la primera tarjeta.
- Afortunadamente al solucionar el problema del tamaño de las imágenes quedó también resuelto el de la velocidad de transferencia de imágenes, ya que la cámara con una velocidad de transferencia menor debe ser conectada también a la primera tarjeta.

La figura 3.7 muestra una pantalla de la aplicación utilizada en cuyos *buffers* se puede ver una secuencia con imágenes simultáneas de la cámara TIR (zona superior de cada *buffer*) y MIR (zona inferior) de un fuego de laboratorio adquiridas en RAM. En la parte derecha se muestran los múltiples parámetros configurables de dicha aplicación. Cada una de las imágenes de una secuencia contiene las imágenes simultáneas procedentes de cada cámara y su tamaño por tanto es de 320x492 píxeles de 2 bytes cada uno. Para que la adquisición sea correcta en la imagen TIR se pierden una serie de líneas, siendo sus dimensiones finales de 320x236 píxeles (en lugar de 320x240 píxeles).

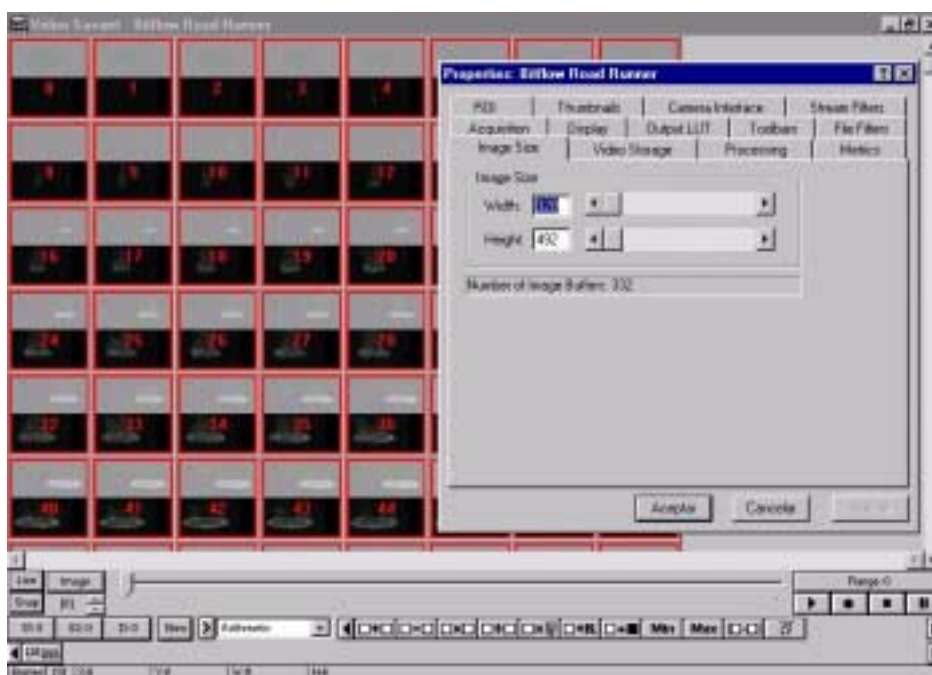


Figura 3.7. – Imagen de la aplicación empleada para el control y gestión de las tarjetas de adquisición y para la adquisición de imágenes digitales, donde se muestra una secuencia de imágenes simultáneas de una quema de laboratorio adquiridas con el espectrómetro de imagen IR (TIR en la zona superior de cada *buffer* y MIR en la inferior).

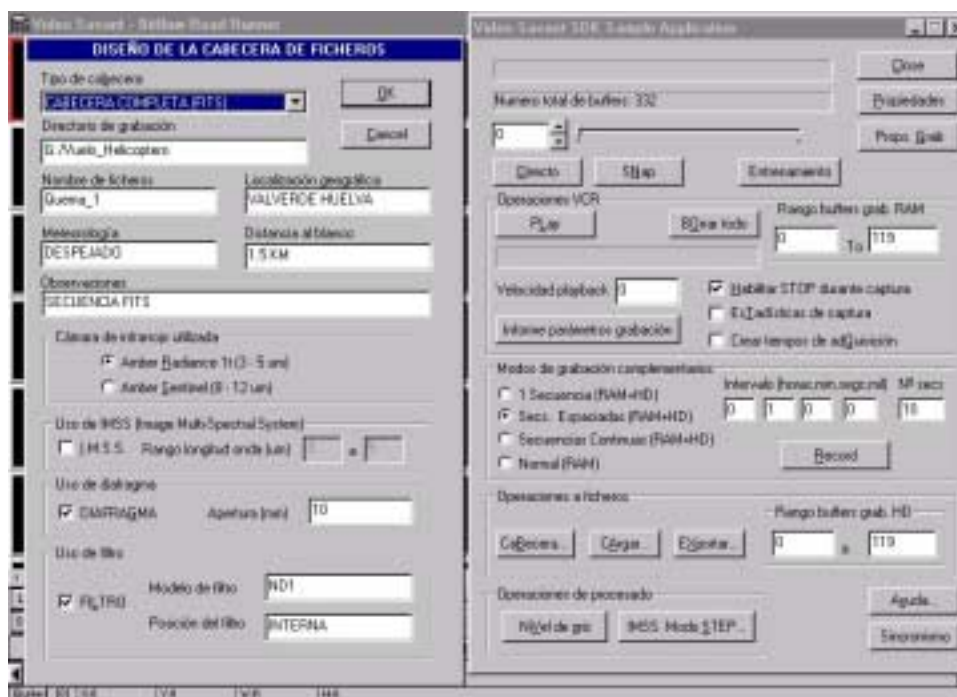


Figura 3.8. – Pantalla donde se muestran las funciones desarrolladas para el sistema de control y adquisición de imágenes utilizado en el espectrómetro de imagen IR.

Una vez que el sistema de adquisición estuvo totalmente a punto y cumplía los requisitos exigidos para la construcción del espectrómetro de imagen, se le dotó de nuevas funciones, utilizando las librerías de desarrollo disponibles en dicha aplicación informática, para optimizar y automatizar al máximo los procesos rutinarios involucrados en la adquisición de imágenes. Dichas funciones son (figura 3.8):

- Almacenamiento automático a disco duro de las imágenes grabadas en RAM.
- Grabación continuada de secuencias, con la opción de ser volcadas a disco duro automáticamente, seleccionando del número de secuencias y el intervalo de tiempo entre ellas.
- Selección inicial del directorio de almacenamiento así como del nombre del fichero. El nombre del fichero se numera en orden creciente y de manera automática en el caso de grabar más de una secuencia.
- Posibilidad de incluir una cabecera en la que quedarán almacenadas las condiciones y todo tipo de datos necesarios sobre cómo fue hecha la medida. El fichero queda almacenado con formato propio o como FITS (*Flexible Image Transport System*), que es un formato estándar ampliamente utilizado y diseñado originalmente por la NASA para el intercambio de ficheros de imágenes de diferentes instrumentos [website 13].
- Generación de un fichero de tiempos, en los cuales aparece el instante en que se adquirió cada una de las imágenes de cada secuencia en memoria RAM con precisión de milisegundos.
- Posibilidad de comprobar el nivel de gris de una de las imágenes adquiridas, para asegurar que el rango de trabajo es el adecuado y que la imagen no está saturada.

3.2.5. Sistema mecánico de apuntamiento y soporte

El soporte mecánico ideal para proporcionar reproductividad y versatilidad es un *trípode*, robusto y ligero, con una *rótula* suficientemente robusta para soportar el peso las cámaras y de cómodo manejo para facilitar la orientación del sistema. El trípode 161 Mk2 y la rótula fluida 316 de *Manfrotto* [website 14] cumplían razonablemente los requisitos exigidos y por tanto son los que hemos utilizados como soporte mecánico. Las características más importantes de ambos aparecen en la tabla 3.4.

Especificaciones	Trípode 161 Mk2	Especificaciones	Rótula Fluida 316
Peso máximo soportado	20 kg	Peso máximo soportado	16 kg
Peso trípode	7.9 kg	Peso rótula	4.5 kg
Altura mínima	44 cm	Inclinación	$\pm 70^\circ$
Altura máxima	267 cm	Giro	360°

Tabla 3.4. – Especificaciones más importante del trípode y rótula empleados.

Para montar las cámaras sobre la misma rótula ha sido necesario el diseño de una plataforma metálica que se acople al plato de la rótula. En su diseño se han tenido en cuenta los siguientes factores:

- *El peso y dimensiones de las cámaras:* La plataforma debe ser lo más pequeña posible, y los pesos de las cámaras deben equilibrarse para no provocar esfuerzos innecesarios.
- *El alineamiento de las cámaras:* La correlación espacial entre las imágenes MIR y TIR aconseja que el campo de visión, diferente para cada cámara, esté centrado para que los encuadres sean lo más parecidos posibles. Para ello, los ejes ópticos deben quedar paralelos entre sí y contenidos en un plano paralelo al plato de la rótula. Este alineamiento debe ser muy estricto (< 0.76 mrad) para garantizar la reproducibilidad de la co-registración en medidas en diferentes días. Además, deberemos situar la cámara visible, con un campo de visión mayor, de forma que éste englobe el de las anteriores y se pueda realizar un apuntamiento correcto, para tener una misma perspectiva y encuadrar la misma escena.
- *Para evitar el calentamiento* que provoca el DIU sobre la cámara Sentinel al situarlo debajo de ella (en principio es su posición natural, ver apartado 4.1.1), ha sido necesario diseñar un soporte para que no esté en contacto ella.
- *La plataforma tiene que ser ligera*, por lo que se hizo en aluminio y debe *anodizarse* para evitar en todo lo posible los reflejos parásitos que pudieran introducirse en el campo de visión de las cámaras, debido a la alta reflectividad del aluminio.

Teniendo en cuenta todos estos factores y requisitos, en la figura 3.9 se pueden observar las dimensiones y el aspecto definitivo del sistema opto-mecánico de apuntamiento y soporte del espectrómetro biespectral de imagen en el IR, compuesto por la plataforma, con las tres cámaras, montadas sobre la rótula y trípode empleados.

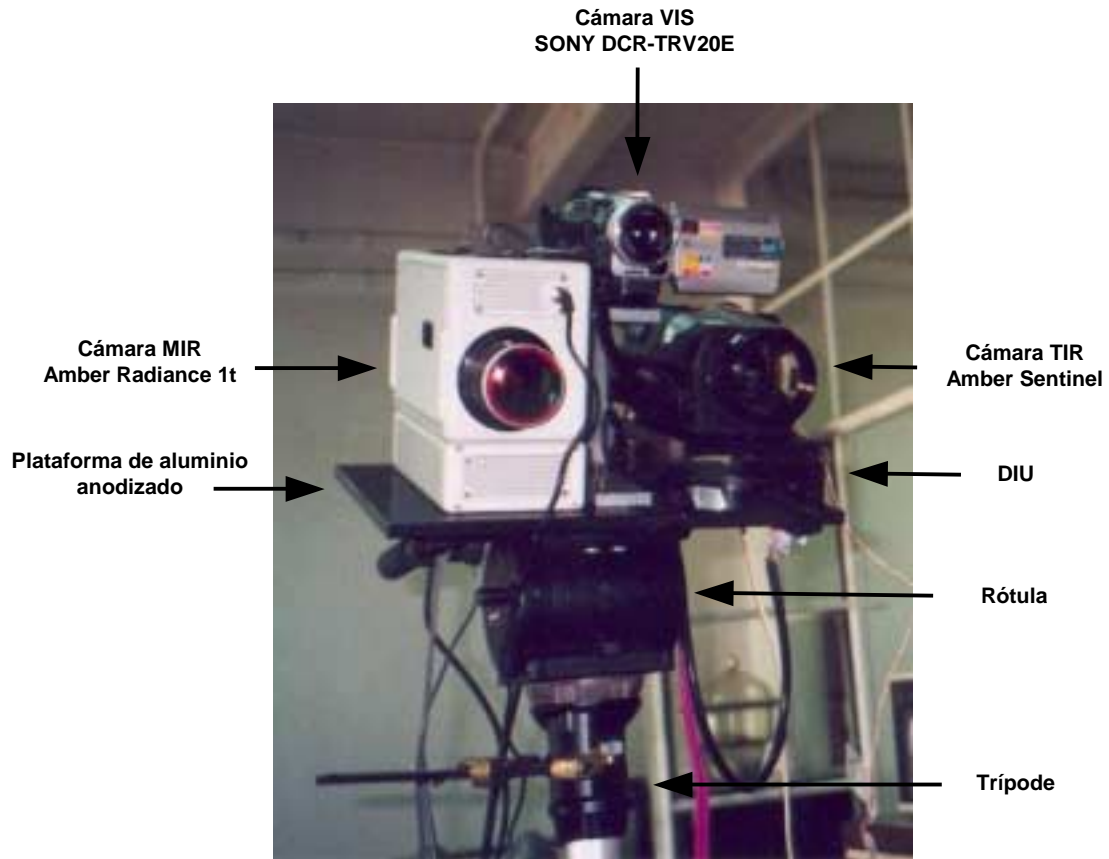


Figura 3.9. – Aspecto definitivo del sistema opto-mecánico del espectrómetro biespectral de imagen IR.

3.2.6. Sistema de visualización

El sistema de visualización es fundamental para la monitorización y control de las medidas, y debe permitir visualizar:

- el menú de control de la cámara MIR.
- la escena captada por cada una de las cámaras en cada momento para asegurar y verificar un adecuado enfoque y encuadre.
- la pantalla del ordenador en condiciones de excesiva iluminación y reflejos solares (condiciones muy frecuentes en su uso en campo).

Por tanto los requisitos que debe cumplir este monitor para realizar dichas tareas son:

- Entrada de vídeo compuesto para los sistemas PAL/CCIR y NTSC/RS-170 (sistemas de video europeo y norteamericano en color/blanco y negro, respectivamente).
- Entrada VGA.
- Pantalla TFT.
- Peso y dimensiones reducidas

- Consumo reducido.

Estas condiciones son muy estrictas y fue difícil encontrar un monitor que las cumpliera, finalmente fue elegido el modelo mx 1500 de Liesegang [website 15].

3.2.7. Sistema de alimentación autónomo

El espectrómetro biespectral de imagen IR descrito es capaz de funcionar en laboratorio o en lugares donde se tiene acceso a la red eléctrica convencional. Pero para medidas de campo, donde habitualmente esto no es posible, necesitamos suministrarle la potencia necesaria para que funcione de manera autónoma. Las necesidades de potencia mínimas son las que se detallan en la tabla 3.5.

Equipo	Consumo (W)
Cámara MIR	45
Cámara TIR	6
Cámara VIS	–
Ordenador + Monitor	150
Sistema de visualización	45

Tabla 3.5. – Consumo de los diferentes equipos del sistema.

Se estudiaron dos soluciones, las dos válidas y útiles. La primera fue utilizar baterías de automóvil conectadas a convertidores de corriente continua a corriente alterna. En concreto, se usó una batería de automóvil de 95 Ah, y un convertidor de corriente continua de 12 V a corriente alterna de 220 V @ 50 Hz APS INT 400, que proporciona hasta 400 W de potencia. Las características del equipo se detallan en el Apéndice B.

La segunda alternativa para generar corriente alterna a 220 V y con la potencia necesaria fue utilizar un generador de gasolina, a partir del cual obteníamos directamente corriente alterna a 220 V. Las características del generador utilizado aparecen en el Apéndice B.

3.3. Adecuación del espectrómetro de imagen IR para embarcarlo en helicóptero

El sistema descrito anteriormente es operativo para realizar medidas de laboratorio y de campo. No obstante, en el desarrollo de este trabajo se planteó un objetivo más ambicioso: la adecuación del espectrómetro biespectral de imagen en el IR para la toma de imágenes desde una plataforma aérea: un helicóptero. Este trabajo se realizó en el marco del proyecto europeo FUEGO 2: *Instrument Design Prototype Construction and Validation*, financiado por la comisión europea dentro del *IV Framework Programme* (programa *Environment & Climate*) [website 1], con el fin de obtener imágenes en el infrarrojo medio y térmico de incendios forestales. Es importante señalar que las modificaciones que se realizaran en el sistema de adquisición están encaminadas a la toma eventual de medidas desde un helicóptero y no para que el sistema quede de manera permanente ubicado en el mismo. El diseño se ha realizado para un helicóptero Bell 205 [website 5] aunque también sería válido para el Bell 206 [website 6].

Las modificaciones que debemos abordar son de diversa índole. Ahora deberemos ser capaces de realizar las medidas en un entorno más hostil, ya que el espacio disponible será mucho más reducido, y se trata de un lugar móvil sometido continuamente a vibraciones en los tres ejes. Las condiciones para obtener potencia eléctrica para todos los equipos serán diferentes a las encontradas en laboratorio o en tierra, y también debemos aligerar cuanto sea posible el peso final del sistema.

La primera tarea realizada fue tomar medidas del interior del helicóptero y decidir la ubicación del sistema para plantearnos el diseño de una plataforma que albergara todos los equipos necesarios. En principio, las únicas restricciones en cuanto a su ubicación eran, junto con las lógicas para la seguridad en vuelo, el reducido espacio y la colocación de las cámaras IR, ya que el material de las ventanas del helicóptero es opaco en el IR, y por lo tanto se tuvo que volar sin las ventanas situando los objetivos de las cámaras en dichos huecos.

Para explicar las modificaciones realizadas, seguiremos la división en subsistemas efectuada en la sección anterior, a la que se añade un nuevo subsistema para la grabación de audio y video IR analógico, distinguiendo por tanto los cinco

grandes grupos que integrarán el espectrómetro biespectral de imagen en el IR embarcable:

- Sistema óptico.
- Sistema mecánico.
- Sistema de control, adquisición y visualización.
- Sistema de grabación de vídeo y audio analógicos.
- Sistema de alimentación.

3.3.1. Sistema óptico

El núcleo del sistema constituido por las dos cámaras IR y también por la cámara visible continúa siendo el mismo, salvo la sustitución del cableado por uno de dimensiones adecuadas debido al reducido espacio disponible. El principal problema por resolver para el sistema óptico ha sido aislarlo de las vibraciones que se producen en el interior del helicóptero. Éste es uno de los principales objetivos del sistema mecánico.

3.3.2. Sistema mecánico

Se ha diseñado una estructura de aluminio que debe contener: la rótula, la plataforma en la que se fijan las tres cámaras (cuyo tamaño se que ha tenido que reducir) y por supuesto las tres cámaras. La rótula debe tener capacidad de realizar giros en dos de los tres ángulos posibles, azimut y picado.

Para que las vibraciones sean absorbidas de manera más efectiva y no se amplifiquen debido a la geometría, es necesario que el centro de gravedad de la masa que queremos aislar quede por debajo del punto de apoyo que la sujeta. Para conseguirlo, la estructura que contiene la cámara y la rótula ha sido suspendida de cuatro amortiguadores situados en los cuatro pilares de otra estructura externa (como se puede observar en la parte izquierda de la figura 3.11). Esta estructura externa está unida rígidamente a una mesa de aluminio que queda fijada al suelo del helicóptero mediante cuatro tensores (figura 3.11).

Todos los amortiguadores son sistemas oscilatorios, que tienen una frecuencia de resonancia y amortiguan a frecuencias superiores. Para amortiguar las vibraciones que se producen en el helicóptero nos interesa que la frecuencia de resonancia sea baja. Para llegar a la configuración final se probaron diferentes tipos de amortiguadores de Paulstra Vibrachoc [*website* 18], eligiéndose finalmente unos realizados en silicona

líquida al vacío muy utilizados en aviónica, modelo E1FH 2507 01 (figura 3.10, izquierda).

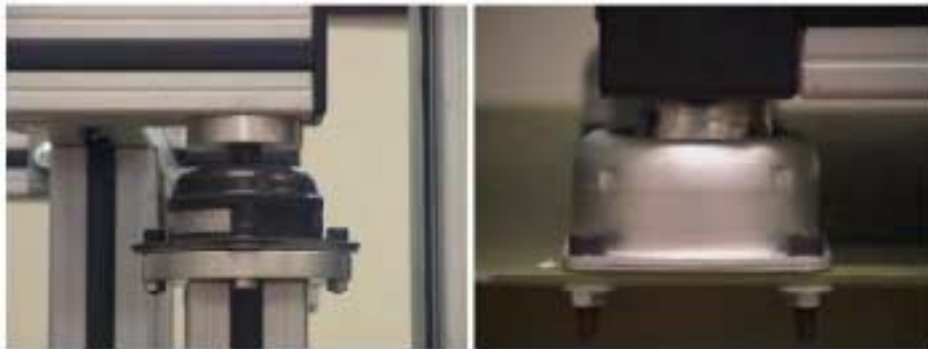


Figura 3.10. – Amortiguadores utilizados para aislar de las vibraciones el sistema óptico (izquierda) y el sistema de adquisición y visualización (derecha).

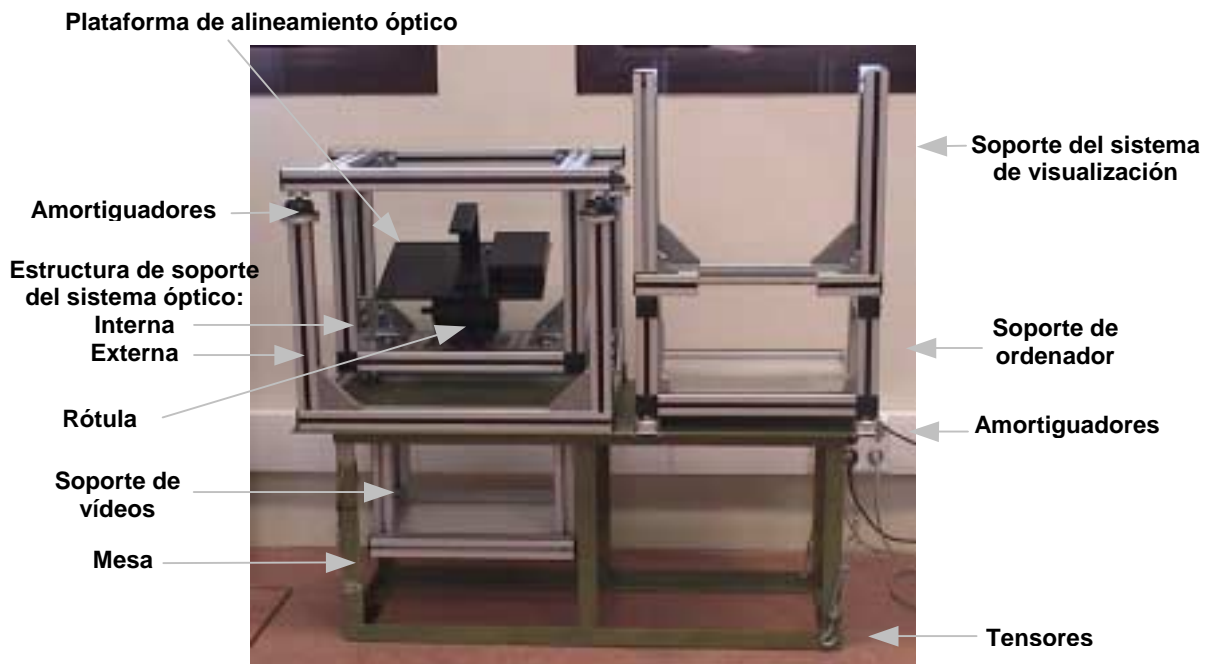


Figura 3.11. – Fotografía del sistema mecánico necesario para embarcar el espectrómetro de imagen IR en helicóptero. Estructura de soporte del sistema óptico y grabación analógica (izquierda) y del sistema de adquisición, control y visualización (derecha).

El sistema de adquisición, control y visualización también debía aislarse de las vibraciones. Para su ubicación se utilizó una estructura de aluminio (figura 3.11 derecha) que soporta el ordenador portátil y la pantalla de visualización y descansa sobre cuatro amortiguadores que se fijan a la mesa de aluminio. El tipo de amortiguador utilizado en este caso fue el modelo 7002 LA, también adecuado para la protección de equipos electrónicos e informáticos embarcados en cualquier tipo de vehículo, pero con

una rigidez mayor que los utilizados para la estructura de la cámara (figura 3.10 derecha). Las características técnicas y especificaciones de estos amortiguadores se detallan en el Apéndice C.

3.3.3. Sistema de control, adquisición y visualización

El sistema de tierra estaba constituido por un ordenador de sobremesa y una pantalla para la visualización de las cámaras. El principal problema que debíamos abordar para embarcarlo en helicóptero era la reducción de peso, dimensiones y consumo eléctrico del ordenador y su monitor, ya que la pantalla de visualización era adecuada para ser embarcada.

Dado que el ordenador debería ser lo más compacto posible y además admitir la posibilidad de incorporar tarjetas de adquisición digital de imágenes para bus PCI, se optó por la utilización de un ordenador portátil (*Toshiba* modelo *Tecra 510 CS* [*Tecra 510 96*]) al que se puede acoplar un módulo denominado *Desk Station* (*Toshiba Desk Station V Plus* [*Desk Station 96*]), que permite su ampliación para la instalación de tarjetas y diferentes unidades de almacenamiento o lectura como discos duros, lectores ópticos, etc.

Una vez determinado el ordenador, hubo que instalar todo el sistema de adquisición descrito en el apartado 3.2.4, lo que obligó a solucionar de nuevo no pocos problemas de configuración del sistema (en cuanto a la instalación del sistema operativo, configuración de las tarjetas de adquisición de imágenes, gestión de las interrupciones del sistema operativo, etc).

3.3.4. Sistema de grabación de vídeo y audio analógicos

Una de las nuevas características que posee este sistema de adquisición es la posibilidad de realizar la grabación analógica de las imágenes de las dos cámaras IR. Es necesario recordar que las salidas de vídeo compuesto de las cámaras IR son de diferentes sistemas, PAL y RS-170. Por esta razón se han elegido dos vídeos estándar que permiten la grabación de señales de ambos tipos, y que además detectan automáticamente de cual de ellos se trata. Además, se ha incorporado un micrófono para la grabación de audio en dichas cintas.

Esta grabación de video y audio analógicos se realiza con el fin de tener un registro secuencial completo de todas las medidas realizadas desde el helicóptero y de

las incidencias del vuelo. Hay que recordar que la grabación digital no se efectúa de manera continua durante todo el vuelo, debido a que no todas las imágenes que se podrían captar desde el helicóptero son necesarias para el estudio, y además, no se puede grabar continuamente imágenes durante un tiempo demasiado largo. La razón es que la grabación digital se realiza a través de la memoria RAM antes de almacenarse en disco duro, y durante esta operación de almacenamiento el sistema no puede adquirir. Lógicamente, tener información secuencial de todas las circunstancias acaecidas durante la toma de medidas de cualquier tipo es de vital importancia para el estudio y análisis posterior de las mismas, por ello, ante la dificultad para la toma de notas de este tipo en el helicóptero, es muy útil tener un equipo de grabación que realice esta tarea.

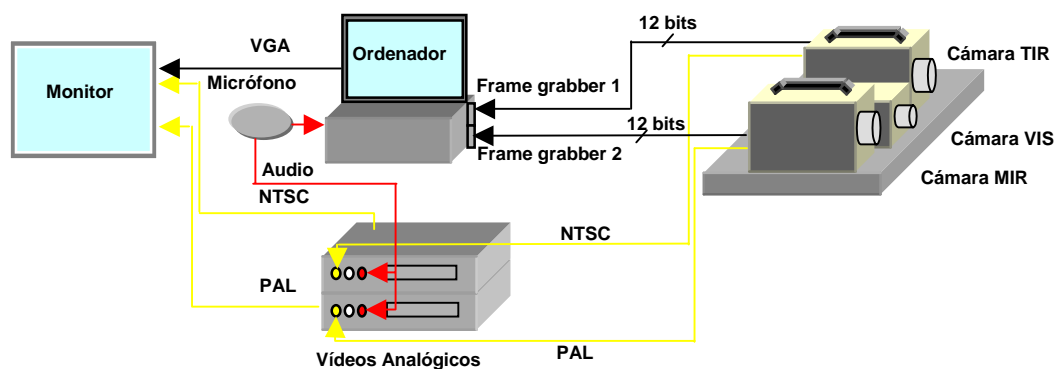


Figura 3.12. – Esquema de conexiones de los sistemas de control adquisición, grabación y visualización.

Las conexiones que se deben realizar para la grabación analógica de las señales de las cámaras IR no deben impedir la visualización de las mismas en el monitor del sistema de adquisición. Por este motivo la señal analógica de cada cámara IR se conecta a la entrada auxiliar de vídeo de cada magnetoscopio y a su vez esta señal se extrae a través del conector SCART “euroconector”, una vez convertida dicha salida en una compatible con la de la pantalla de visualización. Un esquema de todas las conexiones de vídeo y audio tanto digital como analógico puede verse en la figura 3.12.

3.3.5. Sistema de alimentación

El sistema de alimentación es uno de los elementos que hubo que cambiar totalmente respecto al utilizado para medidas de tierra. Evidentemente el motor de gasolina generador de corriente alterna no se puede utilizar dentro del helicóptero, ni

tampoco las baterías convencionales por razones de seguridad (riesgo de vertido del ácido).

Como alternativa se consideró en primer lugar la posibilidad de la utilización de baterías secas, pero la autonomía proporcionada por una sola de estas baterías es escasa y el uso de varias encarece el sistema e incrementa su peso final. Por esta razón se buscó un convertidor de 24-28 V de corriente continua a 220 V de corriente alterna @ 50 Hz, ya que en el helicóptero se puede disponer de una toma continua a esta tensión con una potencia suficiente para alimentar todos los equipos. El modelo CP 600 (Apéndice C) cuyas características más importantes se muestran en la tabla 3.6, resultó adecuado para este cometido.

Especificaciones	CP 600
Potencia nominal de salida	600 W
Sobrecarga admitida (5 s)	1000 W
Tensión DC de entrada	24 – 28 V
Tensión de salida	220 V AC ($\pm 7\%$)
Frecuencia de salida	50 Hz ($\pm 2\%$)
Peso	15.7 kg
Dimensiones (largo x ancho x alto)	430x205x175 mm

Tabla 3.6. – Características del convertidor CP 600 utilizado para alimentar el sistema embarcado en el helicóptero.

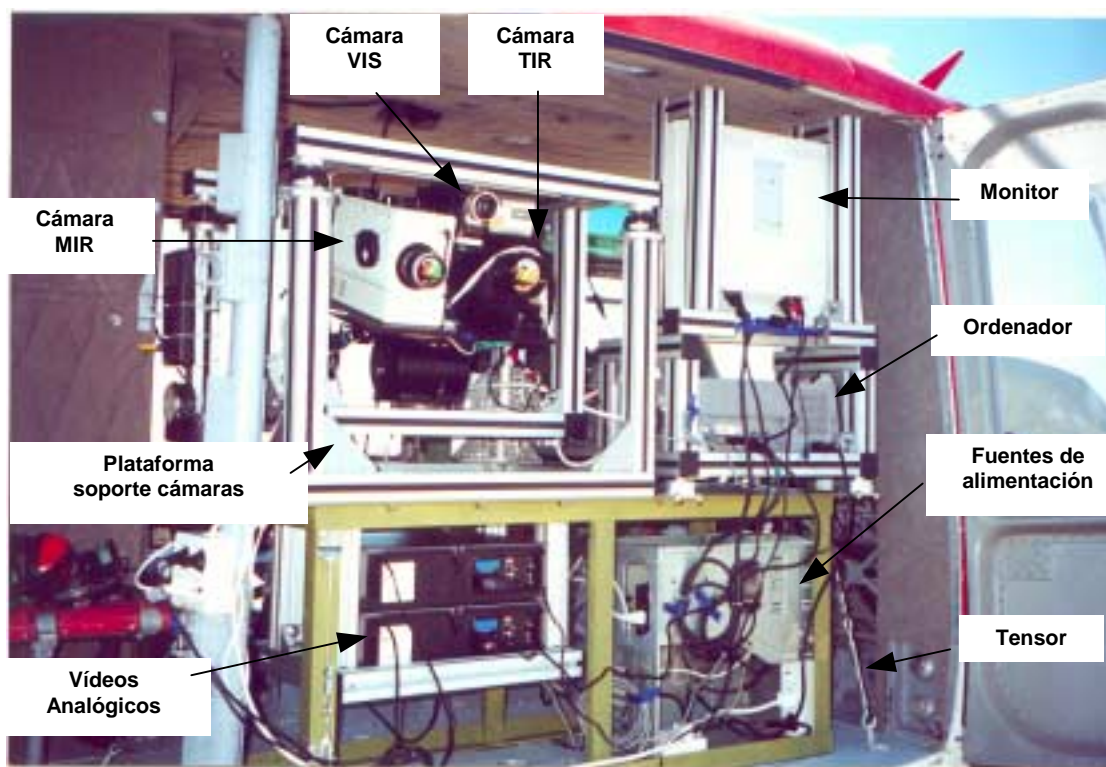


Figura 3.13. – Espectrómetro biespectral de imagen en el IR embarcado en un helicóptero Bell 205.

Una vez realizadas todas las modificaciones descritas, el sistema puede ser utilizado embarcado en helicóptero. En la figura 3.13 muestra la disposición del mismo en un helicóptero Bell 205.

3.4. Espectrómetro de imagen hiperespectral en el infrarrojo medio

El sistema hiperespectral de imagen con el que cuenta nuestro laboratorio consiste en un sistema dispersivo denominado *Image Multi-Spectral Sensor* (IMSS) (apartado 2.5.2) que se acopla a la cámara MIR Amber Radiance 1t (apartado 3.2.1) y opera en la banda espectral de 3 a 5 μm (figura 3.14).



Figura 3.14. – Sistema de imagen hiperespectral en el infrarrojo medio, IMSS acoplado a la cámara Amber Radiance 1t.

Las características de la cámara utilizada ya se han detallado anteriormente (apartado 3.2.1) y también el concepto de este sistema hiperespectral (apartado 2.5.2). Como se indicó en ese apartado, el sistema dispone de una óptica difractiva que dispersa la radiación a lo largo del eje óptico y a la vez se utiliza para enfocar las diferentes longitudes de onda. Por ello, su distancia focal varía entre 82 mm @ 5 μm hasta 137 mm @ 3 μm . Para 4 μm el sistema tiene una distancia focal 103 mm y un número F de 2.3. A esta longitud de onda la óptica difractiva tiene su máximo rendimiento, el 100 % (el rendimiento es mayor del 80 % en toda la banda de 3 a 5 μm). Las especificaciones del sistema de imágenes hiperespectrales en su conjunto se muestran en la tabla 3.7.

Especificaciones	Sistema Hiperespectral
Rango espectral	3.0 – 5.0 μm
Resolución espectral	0.25 % $\Delta\lambda/\lambda$ (0.01 μm @ 4 μm)
Número F (F#) @ 4 μm	2.3
FOV @ 4 μm	5.3° x 5.3° (7.7° en diagonal)
IFOV @ 4 μm	0.37 mrad
Distancia Focal (f)	103 mm @ 4 μm
	82 mm @ 5 μm
	137 mm @ 3 μm
Máximo núm. de imágenes	843
Ancho de banda de ruido espectral	0.040 μm aproximadamente
NESR	$6 \cdot 10^{-7} \text{ W/cm}^2 \mu\text{m sr}$ (en el detector)
Rango dinámico	12 bits
Frame rate	50 fps
Salida de video	PAL/CCIR
Salida digital	HSVB (3.44 MHz)

Tabla 3.7. – Especificaciones del sistema hiperespectral en el IR medio [IMSS 97].

Hay que señalar que para que el sistema hiperespectral sea operativo es necesario además un ordenador con el hardware y software adecuado para el control del sistema y la adquisición y almacenamiento de imágenes.

3.4.1. Montaje y funcionamiento del sistema hiperespectral

Como acabamos de explicar el sistema hiperespectral, consta de tres subsistemas: la cámara Amber Radiance 1t, el IMSS, y el sistema de control y adquisición instalado en un ordenador. El IMSS se compone a su vez de dos elementos: la óptica difractiva que dispersa la radiación y el motor paso a paso que mueve la óptica a lo largo del eje para que ésta enfoque las diferentes longitudes de onda. Este motor está conectado a un segundo dispositivo, *el controlador del motor*, que se maneja a su vez desde un ordenador, vía RS-232, mediante una aplicación desarrollada por PAT denominada HyPAT II [HyPAT II 01] (figura 3.15).

El sistema de adquisición de imágenes utilizado (no suministrado por el fabricante), instalado en dicho ordenador, es básicamente el empleado en el espectrómetro biespectral de imagen en el IR para la adquisición simultánea con las cámaras MIR y TIR, en el que han tenido que hacerse una serie de modificaciones. Éstas afectan al cable utilizado para comunicar la salida HSVB de la cámara con la

tarjeta de adquisición de imágenes, que ahora debe incluir la señal de disparo (*trigger*) procedente del controlador del motor; y a la configuración de la aplicación, ya que ahora la adquisición se inicializa mediante la señal de disparo generada por el controlador cuando la óptica difractiva comienza a moverse. Finalmente, la señal analógica de la cámara se conecta a un monitor para visualizar la toma de datos (figura 3.15).

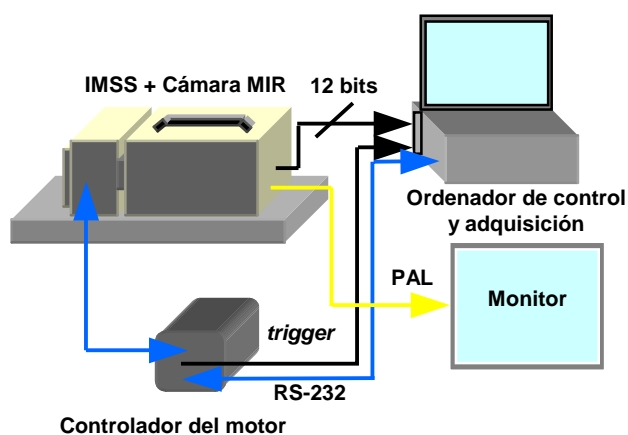


Figura 3.15. – Esquema del montaje del sistema hiperespectral de imagen en el MIR.

Este espectrómetro de imagen tiene dos modos de funcionamiento diferentes denominados SCAN y STEP. El modo SCAN es el modo más rápido de trabajo y en él, una vez seleccionada la banda espectral de trabajo y el número de imágenes que se desean adquirir, el programa de control calcula la velocidad a la que el motor paso a paso tiene que mover la óptica para enfocar las diferentes longitudes de onda, teniendo en cuenta que la velocidad de transferencia de imágenes de la cámara es de 50 imágenes por segundo. Una vez realizada esa selección y ordenado el comienzo de la adquisición, este programa hace que el controlador del motor envíe la señal de disparo a la tarjeta de adquisición para que comience la adquisición de imágenes y mueve la óptica de forma continua para cubrir el rango espectral seleccionado.

El modo STEP es un modo más lento, pero con él se puede alcanzar mayor resolución espectral. El motor paso a paso permite un total de 843 posiciones para la óptica difractiva, o lo que es lo mismo, 843 longitudes de onda diferentes. Este modo de trabajo consiste en que, una vez seleccionado el rango espectral de trabajo, se debe elegir con qué resolución se quiere trabajar (indicada mediante los números 0, 1, 2, 3..., para seleccionar si la óptica debe detenerse en cada una de las posiciones posibles, en una de cada dos, etc). Una vez ordena la adquisición el programa de control, la óptica

llega a una posición y entonces se lanza una señal de disparo a la tarjeta de adquisición y la imagen es adquirida, la lente se coloca en otra posición y se repite la misma operación sucesivamente hasta cubrir todo el rango espectral.

Un inconveniente que tiene este sistema de imagen hiperespectral frente a otros de los comentados en el capítulo 2, como el AVIRIS, es la no simultaneidad de las imágenes para las diferentes longitudes de onda. Aunque la velocidad de transferencia de imágenes de la cámara utilizada es de 50 imágenes por segundo, para el estudio de determinados fenómenos dinámicos puede ser lenta. No obstante, hay que recalcar que la complejidad de un sistema como el AVIRIS es enormemente mayor por los numerosos detectores de diferentes tecnologías que incorpora, gran tamaño, etc [website 6].

Para obtener imágenes hiperespectrales es necesario un sistema de adquisición que sea compatible con la cámara Amber Radiance 1t que suministra las imágenes y además, debe ser accionado mediante la señal de disparo que proporciona el controlador del motor, para indicar el inicio de la adquisición de una secuencia (modo SCAN) o de cada una de las imágenes (modo STEP).

El sistema de adquisición que utilizaremos se desarrolló aprovechando la experiencia y los elementos utilizados en el espectrómetro biespectral de imagen IR. La tarjeta de adquisición utilizada en dicho sistema admite una señal de disparo, como la suministrada por el controlador del motor, para la adquisición de una secuencia de imágenes (modo SCAN). Además la aplicación empleada para el control y adquisición de imágenes en dicho sistema, debidamente configurada, nos permite realizar correctamente la adquisición de este modo. Sin embargo, se debe señalar que con este sistema no se pudo realizar la adquisición en el modo de trabajo STEP del IMSS, debido a que la tarjeta utilizada no admite una señal múltiple de disparo para capturar imágenes a cada una de las señales. Para trabajar en este modo se debería utilizar otra tarjeta del mismo fabricante (de reciente aparición) que admite diferentes modos de señal de disparo.

La adquisición de una secuencia de imágenes hiperespectrales o *imagen cúbica* con este sistema en el modo SCAN requiere los siguientes pasos:

- Programa de control del IMSS
 - Configuración de las comunicaciones con el IMSS.
 - Selección del modo de trabajo del IMSS: SCAN.

- Selección de la banda espectral en la que se quiere trabajar entre 3 y 5 μm .
- Seleccionar el número de imágenes que se quiere tomar en la banda elegida, dentro de las posibilidades que permite el motor paso a paso.
- Aplicación para la adquisición de imágenes:
 - Configuración para la adquisición de una secuencia por señal de disparo.
 - Selección del número de *buffers* de memoria RAM necesario dependiendo del número de imágenes que se vayan a tomar, quedando dicha aplicación a la espera de la señal de disparo.
- Programa de control del IMSS:
 - Se ordena la adquisición y el controlador del motor paso a paso lanza la señal de disparo a la tarjeta de adquisición y comienza a mover la óptica.

La óptica comienza a desplazarse por el eje óptico del sistema a la vez que comienza la adquisición de las imágenes. Este proceso genera dos ficheros:

- Un fichero generado por el software de control con datos del IMSS: intervalo espectral, modo de trabajo, velocidad y aceleración con la que se ha movido la óptica, y demás parámetros del equipo.
- Fichero de las imágenes adquiridas, generado por el sistema de adquisición.

En el apartado 4.2.5 se aborda el preprocesado que es necesario realizar para poder trabajar con las imágenes espectrales obtenidas.

Conclusiones del capítulo

Al comenzar este capítulo explicábamos que un espectrómetro biespectral de imagen en el IR debía cumplir los requisitos de correlación temporal, espacial y radiométrica de las imágenes. En las secciones anteriores se ha descrito el diseño e integración, a partir de dos cámaras IR, de un sistema con las siguientes prestaciones:

- Adquisición simultánea (< 0.1 s, en el caso más desfavorable) de imágenes y secuencias digitales en dos bandas IR, a la máxima velocidad que es posible hacerlo, 30 imágenes por segundo.
- Alineamiento de las cámaras IR y visible de manera que el FOV mayor englobe a los menores estando todos centrados para largas distancias, asegurando también que la co-registración es reproducible para diferentes observaciones.

- Adquisición autónoma de imágenes digitales y video digital en el espectro visible.
- Grabación de vídeo analógico en las dos bandas IR y también de audio.
- Sistema de adquisición portátil y autónomo, embarcable en un helicóptero.

Además de la simultaneidad, hay que destacar que la correlación espacial conseguida con el sistema de alineamiento empleado, permitirá efectuar la co-registración de las imágenes IR, y también que al adquirir las imágenes digitales procedentes de la salida directa de las NUC podrán correlacionarse radiométricamente ambas bandas, previa calibración de las cámaras.

Por tanto, a falta de la co-registración y el calibrado de las cámaras (que se exponen en el capítulo 4), podemos decir que el sistema desarrollado es un *espectrómetro biespectral de imagen en el IR*, y que **se ha cumplido el primer objetivo** que nos habíamos marcado (capítulo 1) para la optimización de la detección de fenómenos de estructura espectral mediante imagen IR.

Nuestro segundo objetivo, la aplicación al estudio de combustiones y a la teledetección de incendios forestales, requiere el uso de técnicas de procesado de imagen que se describen en el siguiente capítulo.

La puesta a punto de un sistema hiperespectral de alta resolución en el infrarrojo medio, nos permitirá realizar novedosas propuestas de optimización de la detección mediante imagen IR en casos concretos que se abordarán en el capítulo 7.

Capítulo 4

Técnicas de procesamiento de imagen en teledetección

El objetivo de este trabajo es, como se ha señalado, la optimización de la detección mediante imagen infrarroja de fenómenos de marcada estructura espectral. Para conseguirlo, el primer paso ha sido construir el espectrómetro de imagen IR, cuyas características se han detallado en el capítulo 3. El siguiente paso es determinar las técnicas de procesamiento de imagen que contribuyen a mejorar la detección.

En este capítulo se explicarán brevemente las técnicas de procesamiento digital de imagen y de clasificación que se utilizarán en los capítulos siguientes para conseguir los objetivos marcados en este trabajo. También se detallan los trabajos realizados para la calibración radiométrica de las cámaras IR utilizadas en el espectrómetro de imagen construido.

El *procesado digital* de imágenes en teledetección se refiere a la manipulación numérica de las imágenes digitales adquiridas, incluyendo el *preprocesado*, la *mejora o realce* (*enhancement*) y la *clasificación* de las mismas [Schowengerdt 83].

Preprocesado

El *preprocesado* se refiere a todas las operaciones que es necesario realizar antes de abordar el análisis principal. Las operaciones típicas de preprocesado incluyen [Campbell 96] [Schowengerdt 83]:

- Un *preprocesado geométrico* que generalmente consiste en la *co-registración* de una imagen con otra o el registro de una imagen en un mapa.
- Un *preprocesado radiométrico* en el que se convierten los valores digitales de la imagen a valores de reflectancia, radiancia o temperatura teniendo en cuenta las condiciones de medida y la influencia de la atmósfera.

- Operaciones encaminadas a la *eliminación de ruido* y a la *corrección de defectos* de la imagen debidos a la respuesta del sensor, como ocurre con los “píxeles malos” de las cámaras utilizadas en este trabajo¹.
- *Extracción de características*, que no se refiere a la identificación de alguna característica geográfica o estructural de una imagen, sino a la extracción de características estadísticas de la información de cada banda o de la combinación de las bandas disponibles, con el fin de seleccionarlas o reducir su número, para trabajar solamente con las que realmente contienen la información que necesitamos para el procesamiento principal. Un ejemplo de este tipo de preprocesado es el análisis de componentes principales (apartado 4.2.6).

Es necesario reseñar que, a pesar de que ciertos procedimientos son empleados habitualmente en la fase de preprocesado, no existe una lista de pasos estándar a seguir, y dependiendo del procesamiento principal que se persiga y del sensor del que se obtienen las imágenes, se diseña el preprocesado adecuado. Así, como veremos más adelante, el preprocesado realizado en este trabajo a las imágenes obtenidas del espectrómetro biespectral de imagen IR construido será diferente del realizado a las imágenes del espectrómetro hiperespectral en el infrarrojo medio.

Realce

La *mejora* o *realce* de las imágenes (*enhancement*) consiste en modificar la imagen para la visualización en un monitor, impresión en papel, etc, de manera que se pueda apreciar mejor la información que contiene o alguna característica concreta. Esta mejora se puede conseguir, por ejemplo, seleccionando en el histograma de la imagen la información de interés (este método se suele utilizar para visualizar imágenes de más de 8 bits en un monitor, debido a que éste no admite más de 256 niveles de gris). También se suele utilizar el color para visualizar y realzar información que de otra forma no se podría apreciar de una forma simultánea, generando una imagen denominada de *falso color*. Debido a las características de la visión humana, capaz de distinguir millones de colores, pero solo unos pocos niveles de gris, resultaría imposible distinguir esa información sin recurrir al color. Estas técnicas de mejora de imagen serán utilizadas a lo largo de este capítulo.

¹ “Píxeles malos” es una traducción directa del término en inglés “*bad pixels*” utilizado en cámaras. Un ejemplo clásico es el *sixth-line striping* que se produce en las imágenes del MSS del Landsat debido a la no uniformidad de la respuesta de una línea de detectores del *array* de dicho sensor [Campbell 96].

Clasificación

La *clasificación* es un paso adelante en el procesado digital de imágenes, para intentar reemplazar la interpretación visual por una toma de decisiones basada en procedimientos cuantitativos. Se trata de asignar cada píxel a una categoría o “clase” determinada. El resultado de la clasificación son imágenes en las que el ND en cada píxel es una etiqueta que identifica la categoría a la que se ha asignado ese píxel. La clasificación ha sido objeto de gran interés y estudio en la teledetección desde satélite, porque permite generar cartografía temática e inventarios de uso de suelo, de un modo cuantitativo y objetivo, a partir de las imágenes de satélite [Chuvieco 96]. El ideal de la clasificación es que el proceso sea automático; no obstante, la intervención humana en este procesado es una parte vital para su éxito [Schowengerdt 83]. En cualquier caso, la clasificación de imágenes de satélite por computador ha mostrado un gran potencial para hacer mapas de clases eficientes y consistentes de grandes áreas de la superficie terrestre [Schowengerdt 83].

Dado que las técnicas utilizadas en el preprocesado y realce de imágenes son a menudo comunes y suelen ser conceptualmente distintas de las de clasificación, llamaremos en lo sucesivo “procesado de imagen” a las técnicas que incluyen el preprocesado y la mejora de la imagen y “clasificación de imagen” a aquellas que conducen a la obtención de mapas de clases [Schowengerdt 83].

Las imágenes que utilizaremos en este trabajo deben estar calibradas radiométricamente, en radiancia o temperatura. Un requisito esencial para poder hacer este preprocesado radiométrico es realizar una calibración de las cámaras IR que forman el elemento fundamental del espectrómetro biespectral de imagen en el IR. Posteriormente se detallará el preprocesado seguido para las imágenes adquiridas con este sistema.

4.1. Calibración radiométrica de las cámaras IR

En el apartado 2.6.3 se llegó a una expresión que nos permite calcular la temperatura de brillo en función del número digital de cada píxel de la imagen. Pero ahora debemos encontrar los parámetros B, R y F para cada banda espectral de trabajo y también el *offset* y la ganancia propia de cada cámara, para cada configuración de medida. La utilización de filtros y diafragmas influirá tanto en la transmitancia óptica

del sistema de medida completo, como en el *offset*, debido a que la emisión propia de dichos elementos contribuirá a la radiancia total detectada.

4.1.1. Montaje experimental utilizado para la calibración

Para calibrar las dos cámaras utilizadas en este trabajo el montaje ha sido diferente, debido fundamentalmente, como veremos más adelante, a la deficiente estabilización térmica del detector de la cámara Amber Sentinel (TIR), junto con el calentamiento debido al DIU situado en la parte inferior de la misma.

Montaje experimental para la calibración de la cámara Amber Radiance 1t (MIR)

Para la calibración de la cámara Amber Radiance 1t se ha utilizado un cuerpo negro de laboratorio calibrado, con un colimador situado en su apertura. En la figura 4.1 se muestra un esquema del montaje utilizado.

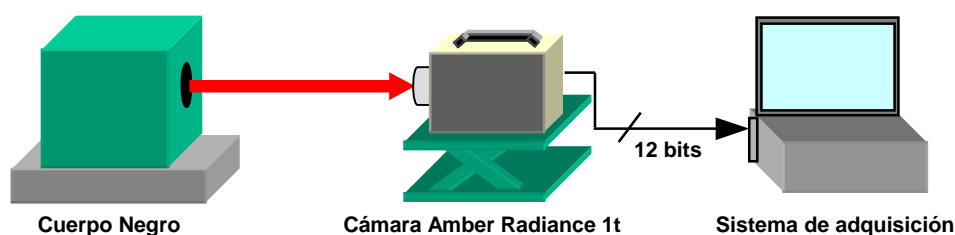


Figura 4.1. – Montaje experimental utilizado para la calibración de la cámara Amber Radiance 1t.

El cuerpo negro utilizado es de *Electro Optical Industries Inc.*, diseñado especialmente para la calibración de sistemas infrarrojos. Consiste en una cavidad cónica con un termopar interno, colocado cerca de la apertura. La temperatura de la cavidad se controla mediante un sistema de control lineal proporcional, diseñado para tener una rápida respuesta con una óptima estabilidad [Blackbody 85]. Dispone de diferentes aperturas seleccionables (para la calibración se ha utilizado la apertura 4). Sus características más importantes se muestran en la tabla 4.1.

Magnitud	Valor
Rango de Temperatura	50 – 1000 °C
Emisividad de la cavidad	0.99 ± 0.01
Precisión en el control	± 1 °C
Estabilidad	± 0.5 °C
Diámetro Apertura 4	10.16 mm

Tabla 4.1. – Características del cuerpo negro utilizado.

La apertura del cuerpo negro está situada en el foco de un espejo parabólico fuera de eje de alta reflectividad, conseguida mediante recubrimiento multicapa de monóxido de silicio sobre aluminio [Colimador 87]. De este modo se obtiene un haz colimado. El colimador tiene una distancia focal $f = 254$ mm, su apertura es de 50.8 mm y el rango espectral de trabajo es de $0.3 - 40 \mu\text{m}$.

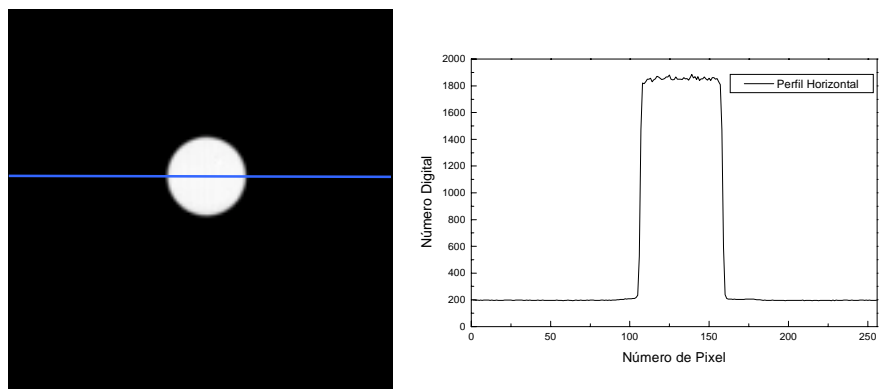


Figura 4.2. – Imagen enfocada de la apertura del cuerpo negro a cierta temperatura (izquierda) y perfil horizontal de la línea indicada (derecha).

Cuando el eje de este haz está perfectamente alineado con el eje óptico de la cámara, la imagen de la apertura al enfocar a infinito será un disco uniforme. Para lograr una perfecta alineación de los ejes, se ha colocado la cámara sobre una rotula con tres grados de libertad ubicada sobre una plataforma que permite modificar la altura. Mediante este montaje, situando la cámara a 24 cm de la salida del haz, y después de alinear los ejes ópticos, las imágenes obtenidas para la apertura del cuerpo negro colimado muestran un disco uniforme como se puede apreciar en la figura 4.2.

Una vez lograda la alineación, se ha variado la temperatura del cuerpo negro dejándolo estabilizar. Para cada temperatura, se han adquirido imágenes digitales, mediante el sistema de adquisición descrito en el apartado 3.2.4, con las que se realizará la calibración.

Montaje experimental para la calibración de la cámara Amber Sentinel (TIR)

La calibración de la cámara Amber Sentinel ha presentado dificultades especiales debido a la fuerte deriva encontrada en los valores de número digital en función del tiempo de funcionamiento. Esta deriva puede apreciarse en las medidas de un cuerpo gris a temperatura constante, realizadas en el laboratorio con una temperatura ambiente estable de 22°C , que se resumen en la gráfica de la figura 4.3.

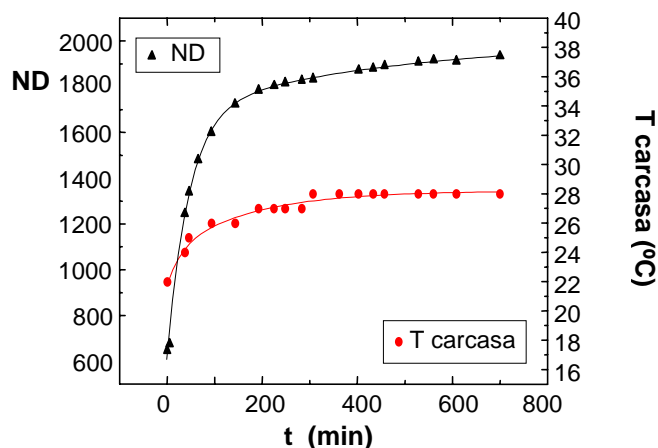


Figura 4.3. – Estudio de la deriva del valor del ND de la cámara TIR en función del tiempo, para un cuerpo gris a temperatura constante. Se puede observar como la variación del valor del ND obtenido sigue la tendencia de la temperatura de la carcasa de la cámara, tomada con un termopar.

El calentamiento interno del detector debido al funcionamiento de la cámara es un problema común en las cámaras de microbolómetros sin refrigerar de primera generación, como es la utilizada, en las que la estabilización térmica del *array* de detectores no está muy bien resuelta [Kruse P.W. 97][Wood 97]. Este calentamiento es la causa de la deriva observada en los valores de ND.

No se ha podido realizar ninguna medida interna de la temperatura de la cámara ya que como se dijo en el capítulo 3, esta cámara es totalmente estanca y no se puede acceder a su interior. Pero si se ha realizado un estudio de cómo ese calentamiento interno se refleja en la carcasa de la cámara. Además de las medidas de termopar que aparecen en la figura 4.3, se ha utilizado otra cámara IR (disponible en el laboratorio), también en la banda de 8 a 12 μm . Se trata de una cámara de barrido calibrada de Agema, modelo THV 488, que permite hacer termografía. Está dotada de un monodetector de HgCdTe refrigerado por nitrógeno líquido (esta cámara no se ha utilizado en el espectrómetro de imagen debido, entre otras razones, a que no posee una salida digital de imágenes de alta velocidad) [Agema 92]. Se ha podido comprobar así que las zonas donde se produce más calor en la carcasa de la cámara TIR que utilizamos en el espectrómetro de imagen son la zona del detector en la parte superior; y sobre todo, la zona inferior de la cámara, especialmente el DIU cuya posición original es adosado a la parte inferior de la cámara (figura 4.4). Por esta razón se decidió que en el sistema de adquisición el DIU debía separarse de la parte inferior de la cámara y

colocarse ambas partes sobre una placa metálica para evacuar el exceso de calor producido por su funcionamiento².

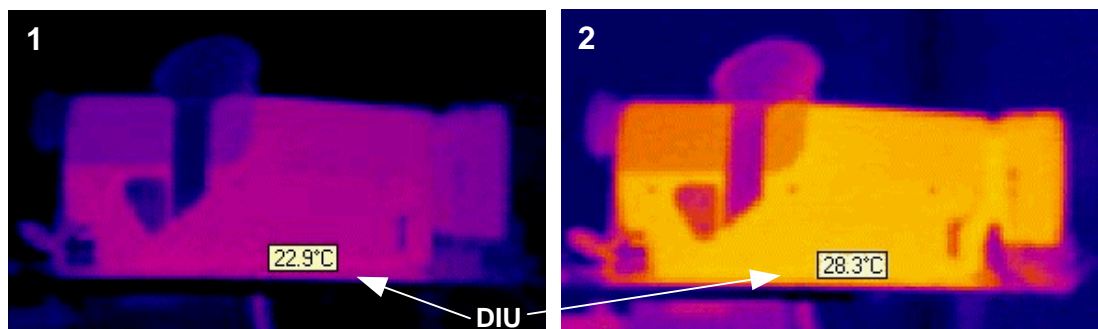


Figura 4.4. – Imágenes IR de la cámara Amber Sentinel + DIU tomadas con la cámara Agema 488. La imagen 1 fue tomada al inicio de una sesión de medida a una temperatura ambiente controlada de 22 °C. La imagen 2 fue tomada dos horas después.

La fuerte deriva que se evidencia en la figura 4.3 hace prácticamente imposible la utilización del cuerpo negro para la calibración según el montaje descrito para la cámara MIR, ya que se necesita tiempo para la estabilización del cuerpo negro al cambiar de una temperatura a otra, y durante este tiempo la deriva en la cámara Sentinel incrementa el *offset* de una forma muy acusada. Para resolver este problema se utilizó como referencia la calibración de la cámara Agema 488, que trabaja en la misma banda espectral, y que previamente se había calibrado con un cuerpo negro. Para ello se creó una escena IR con varios cuerpos, estabilizados a diferentes temperaturas (figura 4.5).

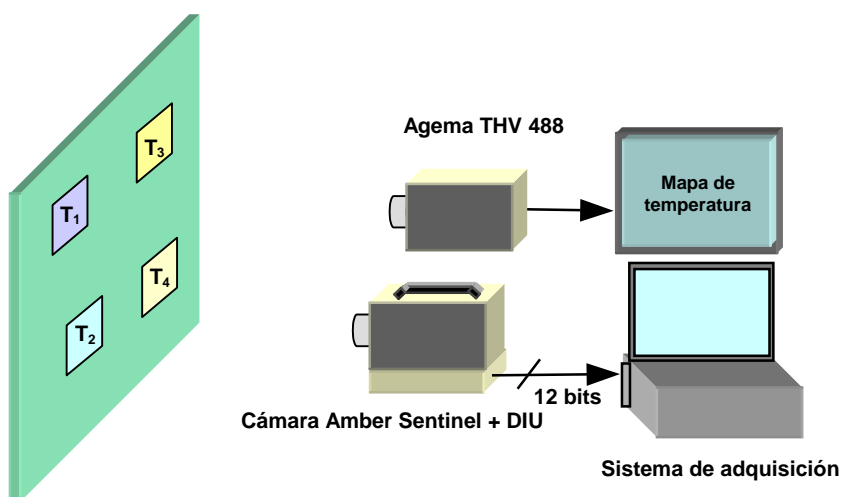


Figura 4.5. – Esquema del montaje experimental utilizado para la calibración de la cámara TIR Amber Sentinel, a partir de la medida de temperatura con la cámara TIR Agema THV 488, previamente calibrada.

² La deficiente estabilización térmica de las cámaras de microbolómetros de primera generación, como la Amber Sentinel, hace que su temperatura de trabajo sea muy crítica. Se ha comprobado que la temperatura ambiente debe estar estabilizada entre 21-22 °C.

Mediante el sistema de adquisición (apartado 3.2.1) se tomó la imagen de dicha escena con la cámara Sentinel, y simultánea e independientemente con la Agema 488. La temperatura de brillo en la banda TIR para los diferentes cuerpos utilizados es obtenida de la imagen de la cámara Agema y se anota junto con el ND obtenido de la cámara Sentinel. De esta forma se obtiene una calibración “instantánea” no afectada por la deriva. Hay que resaltar que esta calibración requiere que la cámara auxiliar (Agema 488) trabaje en la misma banda espectral. En otro caso, las posibles diferencias de emisividad de los cuerpos utilizados introducirían un error importante y difícil de controlar.

4.1.2. Medidas experimentales y resultados de la calibración

En la sección 2.6 se desarrolló la teoría de la calibración radiométrica de las cámaras IR. Podemos resumir los principales resultados expuestos allí de este modo:

- En ausencia de un modelo del escenario y del ambiente, las cámaras nos pueden proporcionar la *temperatura de brillo aparente*.
- Para obtener esa temperatura a partir del número digital es necesario conocer los parámetros $Gain_{cam}$ y $Offset_{cam}$.
- Los parámetros $Gain_{cam}$ y $Offset_{cam}$ sirven para obtener la radiancia (L) a partir de las medidas experimentales de ND (ecuación [2.89])
- A partir de la radiancia (L) obtenemos la temperatura de brillo aparente (T) con la función de calibrado (F^{-1}) (ecuación [2.93])

En este apartado se describe como se han determinado los parámetros de las cámaras ($Gain_{cam}$ y $Offset_{cam}$) y sus funciones de calibrado, exponiéndose los resultados obtenidos. Se da también una estimación de los errores de las temperaturas proporcionadas por las cámaras con el calibrado descrito.

Determinación de la ganancia y *offset* de las cámaras

Para el cálculo de la ganancia y el *offset* global de la cámara, basta con tener en cuenta la expresión [2.89] y despejar ND.

$$ND = Gain_{cam} \cdot L^{CN}(T) + Offset_{cam} \quad [4.1]$$

Conociendo la temperatura T a la que situamos el cuerpo negro³ e integrando la ley de Planck para el rango espectral de trabajo de cada cámara, podemos hallar la radiancia emitida. Representando entonces el valor del ND frente a la radiancia emitida y mediante un ajuste por mínimos cuadrados, obtenemos la pendiente de la recta, que será Gain_{cam} , y la ordenada en el origen, que será $\text{Offset}_{\text{cam}}$. Una vez conocidos estos parámetros, podemos despejar en [4.1] la radiancia L^{CN} para cada ND, y utilizar la función de calibrado ($F^{-1}(L)$ expresión [2.93]) para obtener la temperatura T , para un cuerpo negro, o la temperatura de brillo aparente para cualquier otro cuerpo. Naturalmente, Gain_{cam} y $\text{Offset}_{\text{cam}}$ dependen de la configuración de medida de la cámara, es decir, de la atenuación (filtros y diafragmas utilizados) y tiempo de integración.

Determinación de la función de calibrado

En el apartado 2.6.3 se explicó que la radiancia detectada está relacionada con la temperatura de brillo aparente mediante la *función de calibrado* $F(T)$, que es una aproximación analítica a la integral de la función de Planck en la ventana espectral de trabajo. $F(T)$ depende de tres parámetros (B , R , F) que deben determinarse para cada ventana espectral y rango de temperatura de trabajo. Para garantizar que $F(T)$ sea una aproximación lo mejor posible a la integral de la función de Planck, hemos construido la expresión:

$$\epsilon_{\text{rel}} = \frac{1}{T_f - T_i} \int_{T_i}^{T_f} \frac{F^{-1}[L_D(T, \lambda_i, \lambda_f), B, R, F] - T}{T} dT \quad [4.2]$$

que da un error relativo promedio (en un intervalo de temperaturas dado por (T_i, T_f)) de las temperaturas proporcionadas por F^{-1} , y hemos variado los valores de B , R y F para minimizar el error relativo ϵ_{rel} . De este modo se han obtenido los parámetros que se muestran en la tabla 4.2. Se aprecia que en el IR medio se consigue un buen ajuste con un solo juego de parámetros para todo el intervalo entre 0 y 900 °C, mientras que en el IR térmico, hay que recurrir a tres juegos de parámetros: A entre 0 y 300 °C, B entre 300 y 600 °C y entre 600 y 900 °C. Se puede apreciar que con estos parámetros el error relativo de la temperatura absoluta es como máximo del 0.5% para la banda MIR y del 1.4%, para la banda TIR.

³ Para la calibración de la cámara TIR conocemos la temperatura de brillo aparente de los cuerpos utilizados por medio de la cámara Agema 488.

		3 – 5 μm	8 –12 μm		
			A	B	C
R (W/m ² ·sr)		190954.1	5474.9	5697.7	6318.5
B (K)		3515	1486	1468	1473
F (adimensional)		4	0.49	0.45	0.48
ε _{rel} (%)	0 – 300 °C	0.5	0.3	2.2	4.6
	300 – 600 °C	0.2	3.1	1.1	4.2
	600 – 900 °C	0.3	9.8	6.6	1.4

Tabla 4.2. –Parámetros B, R y F de la función de calibrado para las cámaras utilizadas en el espectrómetro de imagen en el IR, donde se indica el error relativo para cada juego de parámetros en el rango de temperaturas indicado (los parámetros utilizados se resaltan en negrita).

Estimación de los errores en el calibrado de las cámaras IR

Las temperaturas proporcionadas por las cámaras tendrán errores debido a que:

- La función de calibrado es una aproximación a la integral de la ley de Planck. Los errores en temperaturas asociados a esta aproximación han sido estimados en la tabla 4.2.
- Los valores de L que obtenemos mediante Gain_{cam} y $\text{Offset}_{\text{cam}}$ están afectados de un error, que es propagado por la función de calibrado. A continuación calculamos la repercusión de este error en la temperatura.

En una regresión lineal de y frente a x, el error en el valor y_0 proporcionado por la recta de ajuste para un cierto x_0 es [Barlow 89]:

$$\Delta(y_0) = \sqrt{\frac{\sigma^2}{N-2} \left\{ 1 + \left(\frac{x_0 - \bar{x}}{\sigma_x} \right)^2 \right\}} \quad [4.3]$$

siendo:

σ = error de cada valor y_i (supuestos iguales)

N = n° de puntos

\bar{x} = media de x

σ_x = desviación típica de las x_i

A menudo se identifica σ con el “error de precisión del aparato de medida”. En nuestro caso ese error sería $\sigma=1$, dado que la salida de la cámara es digital, lo cual obviamente es una estimación demasiado optimista. En casos como éste [Press 89], es más realista estimar el error σ a partir de la dispersión de los datos, escribiendo

$$\sigma^2 \approx \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (y_i^{\text{medida}} - y_i^{\text{ajuste}})^2 = \sigma_y^2(1-r^2) \quad [4.4]$$

siendo:

r = coeficiente de correlación

σ_y = desviación típica de las y

Sustituyendo [4.4] en [4.3] se obtiene:

$$\Delta(y_0) = \sigma_y \sqrt{\frac{1-r^2}{N-2} \left\{ 1 + \left(\frac{x_0 - \bar{x}}{\sigma_x} \right)^2 \right\}} \quad [4.5]$$

En nuestro caso, utilizamos el ajuste para obtener L a partir de ND , por lo que la ecuación que debemos usar es:

$$\Delta L_0 = \sigma_{DN} \sqrt{\frac{1-r^2}{N-2} \left\{ 1 + \left(\frac{ND_0 - \overline{ND}}{\sigma_{DN}} \right)^2 \right\}} \quad [4.6]$$

Con la regla habitual de propagación de errores aplicada a la función de calibrado inversa:

$$\Delta T = \left| \frac{\partial T}{\partial L} \right| \Delta L = \frac{BR}{\left(\ln \frac{R}{L} + F \right)^2 \cdot L(R + FL)} \Delta L \quad [4.7]$$

y operando se llega a que:

$$\frac{\Delta T}{T} = T \cdot \frac{\Delta L}{L} \cdot \frac{R}{(R + FL)B} \approx \frac{T}{B} \frac{\Delta L}{L} \quad [4.8]$$

Donde ΔL se obtiene de la ecuación [4.6] y L de la expresión [2.89].

Al aplicar esta fórmula con los valores reales del calibrado se encuentra que el error relativo en temperaturas $\Delta T/T$ (con T medida en K) depende fuertemente de la temperatura. Para un rango de medida determinado, toma valores relativamente altos en las temperaturas más bajas y disminuye hasta valores inferiores al 0.25% en la mitad superior del rango de medida (figura 4.6).

Resultados de la calibración de la cámara Amber Radiance 1t (MIR)

Para las diferentes condiciones de medida (utilizando filtros neutros y diafragmas de diferentes diámetros) se han tomado imágenes del cuerpo negro estabilizado a diferentes temperaturas. Un ejemplo de los resultados obtenidos se ilustra en la figura 4.6 para una medida sin filtros ni diafragmas y para el tiempo de integración de la cámara t_3 . En la primera de las gráficas (superior izquierda) se muestra la variación del ND con la

temperatura del cuerpo negro hasta llegar a la saturación del detector en torno a 150 °C. En la segunda gráfica (superior derecha) se ha calculado la radiancia emitida para cada una de las temperaturas a las que se ha situado al cuerpo negro (excepto las saturadas) y se ha representado frente al ND de cada imagen, apreciándose la dependencia lineal de las medidas tomadas. Haciendo un ajuste por mínimos cuadrados de estos datos, se calcula la ganancia y el *offset* de la cámara (Gain_{cam} y $\text{Offset}_{\text{cam}}$) para esta situación de medida.

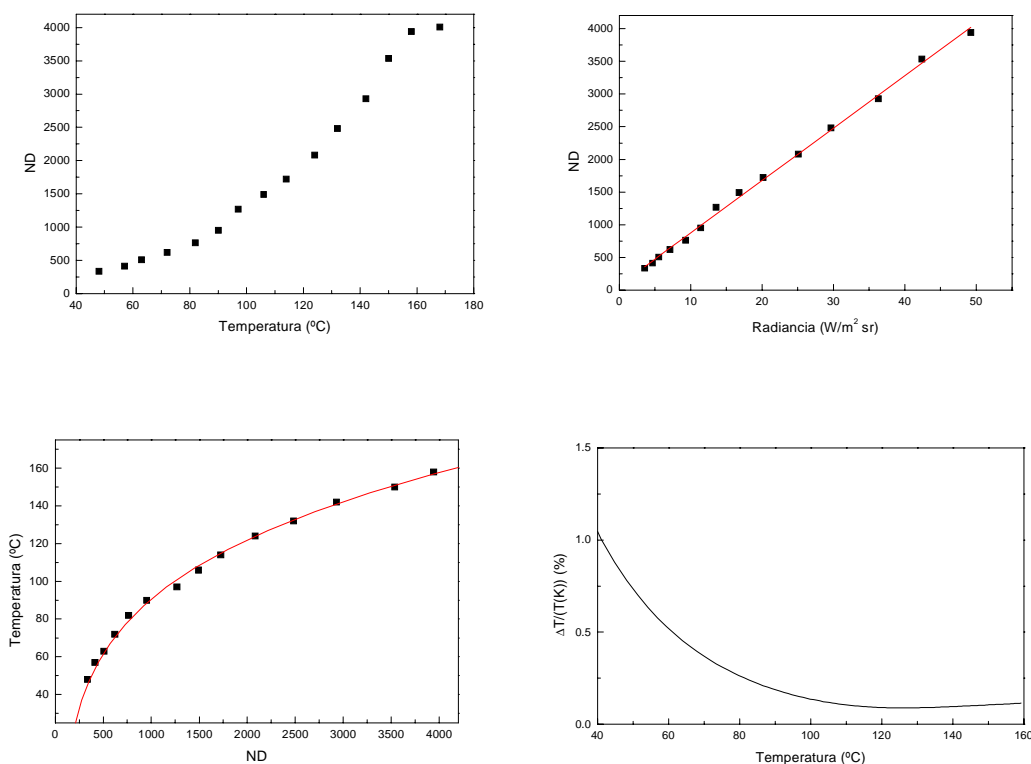


Figura 4.6. – Resultados obtenidos para la calibración de la cámara MIR, sin filtros ni diafragmas y para el tiempo de integración t3.

La tercera gráfica (inferior izquierda) muestra la relación entre ND y la temperatura T obtenida con los valores Gain_{cam} y $\text{Offset}_{\text{cam}}$ calculados y la función de calibrado. Esta gráfica permite “traducir” directamente los ND a temperatura de brillo. En la última gráfica (inferior derecha) se muestra el error relativo cometido para este rango de temperaturas.

La tabla 4.3 resume los principales resultados obtenidos para la calibración de la cámara Amber Radiance 1t. Las condiciones de operación se han variado utilizando tres tiempos de integración diferentes, combinados con cuatro pupilas de entrada conseguidas mediante tres diafragmas con diámetros diferentes. Se han usado también

dos filtros neutros ND1 y ND2, cuyas transmitancias son del 10 % y 1 % respectivamente. En dicha tabla se especifica el rango de temperatura posible para algunas condiciones de operación de la cámara. La temperatura de brillo mínima que se indica es la correspondiente a un valor del ND un 20% superior al *offset* en esas condiciones. La temperatura de brillo máxima se ha definido para un valor del ND de 3800, aproximadamente el 93 % del valor máximo (4095), antes de entrar en saturación el detector.

Cámara MIR		Sin Filtro				Filtro ND1 ($\tau = 0.1$)			
D_{pe} (mm)		21.74	10.75	7.35	3.60	21.74	10.75	7.35	3.60
$t_1 = 1.249$ ms	T_{min} (°C)	-21	21	53	105	59	106	146	237
	T_{max} (°C)	62	92	123	192	141	212	277	420
	Gain	582.3	189.7	78.2	20.1	57.8	15.8	6.70	1.76
	Offset	691	1410	1753	1815	1559	1660	1665	1664
$t_2 = 0.469$ ms	T_{min} (°C)	-28	23	56	102	59	106	146	237
	T_{max} (°C)	102	154	203	301	224	325	423	676
	Gain	223.2	65.3	26.7	7.540	20.2	6.04	2.59	0.620
	Offset	186.2	527.1	650.9	642.1	550.3	567.7	572.7	594.6
$t_3 = 0.157$ ms	T_{min} (°C)	-21	23	50	102	58	109	140	241
	T_{max} (°C)	156	230	296	447	325	483	615	1049
	Gain	71.3	29.6	9.18	2.43	6.77	1.92	0.920	0.196
	Offset	86.9	167.6	183.1	209.0	163.0	181.7	190.2	198.6

Tabla 4.3. – Resultados de la calibración para la cámara MIR Amber Radiance 1t para diferentes configuraciones de medida.

Resultados de la calibración de la cámara Amber Sentinel (TIR)

La metodología utilizada en la calibración de la cámara TIR ha sido idéntica a la utilizada para la cámara MIR, si bien debemos recordar que el montaje experimental ha sido diferente y también que en este caso no tenemos opción de cambiar los tiempos de integración de la cámara, por lo que las diferentes configuraciones de medida se obtienen mediante la utilización de diafragmas con diferentes diámetros.

La calibración ha permitido estudiar la variación del *offset* y la ganancia en función del tiempo de funcionamiento de la cámara. Las gráficas de la figura 4.7 reflejan que el calentamiento producido en la cámara sólo afecta al valor del *offset*, que sigue la tendencia mostrada en la figura 4.3. El cambio producido en este parámetro sigue una variación fácilmente predecible para unas condiciones ambiente fijas, como

las de laboratorio, pero en condiciones de medida en campo necesitaremos una referencia de temperatura para fijar el valor del *offset*, o bien estabilizar de alguna forma la temperatura de operación de la cámara.

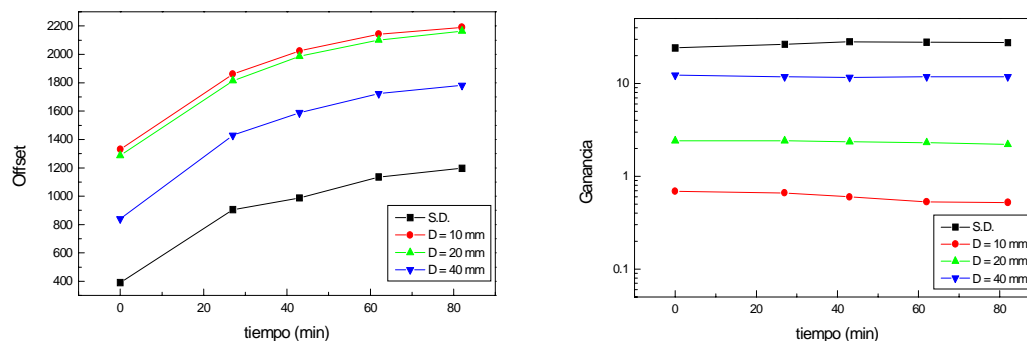


Figura 4.7. – Estudio de la variación temporal de la ganancia y el *offset* de la cámara TIR para diferentes configuraciones de medida (sin diafragma (S.D.) y con diafragmas de 10, 20 y 40 mm de diámetro).

Cámara TIR			Sin Filtro			
Tiempo (min)	Serie	D _{pe} (mm)	67.00	40.00	20.00	10.00
0	1	T _{min} (°C)	-75	-26	105	277
		T _{max} (°C)	133	200	540	1320
		Gain	24.20	12.29	2.41	0.69
		Offset	395	806	1191	1199
27	2	T _{min} (°C)	-53	1	140	356
		T _{max} (°C)	107	174	461	1130
		Gain	26.43	11.807	2.409	0.662
		Offset	877	1408	171	1802
43	3	T _{min} (°C)	-51	7	121	400
		T _{max} (°C)	98	167	440	1130
		Gain	28.18	11.64	2.35	0.60
		Offset	1025	1587	1951	1984
62	4	T _{min} (°C)	-46	11	162	454
		T _{max} (°C)	95.0	158.0	427.0	1175.0
		Gain	27.87	11.78	2.31	0.53
		Offset	1129	1710	2080	2111
82	5	T _{min} (°C)	-44	13	172	467
		T _{max} (°C)	93.0	155.0	430.0	1175.0
		Gain	27.59	11.80	2.20	0.52
		Offset	1190	1780	2157	2185

Tabla 4.4. – Resultados de calibración de la cámara Amber Sentinel (TIR) para las diferentes configuraciones de medida y diferentes tiempos de operación de la cámara.

La tabla 4.4 resume los resultados obtenidos para la calibración de la cámara Amber Sentinel en las diferentes condiciones de medida, para diferentes tiempos de funcionamiento de la cámara. Los valores de T_{\min} y T_{\max} (que se han definido siguiendo el criterio utilizado para la cámara MIR) permiten apreciar que la deriva produce una notable pérdida de rango dinámico.

La gráfica de la figura 4.8 muestra cuales son las temperaturas de brillo máximas y mínimas para ambas cámaras en función de la transmitancia normalizada de la óptica del sistema, es decir, en función de la atenuación empleada. Los resultados mostrados para la cámara MIR son los obtenidos utilizando el tiempo de integración más corto, t_3 . Los criterios para fijar las temperaturas máximas y mínimas son los utilizados en las dos tablas anteriores. Es de destacar el amplio intervalo de temperaturas en el que se ha realizado la calibración de las cámaras (equivalente a casi cinco ordenes de magnitud de radiancia) necesario para poder estudiar, evitando la saturación, fenómenos como los incendios.

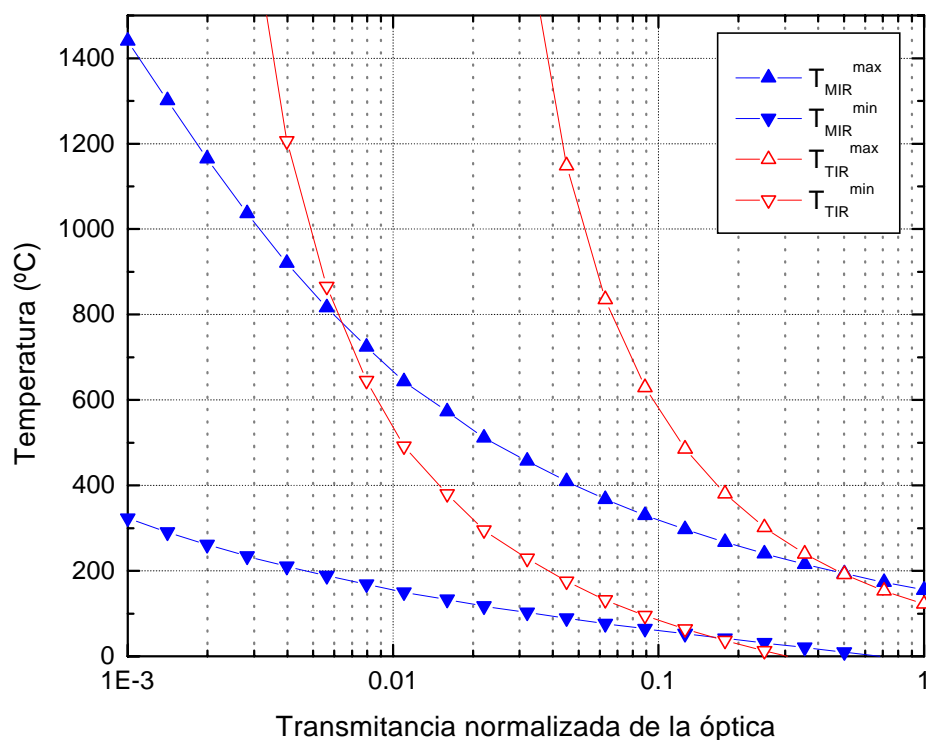


Figura 4.8. – Gráficas conjuntas donde se muestra el rango de temperaturas de trabajo para ambas cámaras en función de la transmitancia de la óptica (normalizada al valor unidad cuando no se utiliza atenuación). Para la cámara MIR se ha utilizado el tiempo de integración t_3 .

4.2. Preprocesado para las imágenes del espectrómetro de imagen IR

Como indicamos al inicio del capítulo, en el preprocesado digital de imágenes no existe una serie estándar de pasos a realizar, sino que éstos dependen en gran medida del sensor utilizado para captar las imágenes y también del análisis posterior que se vaya a realizar con ellas.

El objetivo final de este trabajo es la optimización de la detección mediante imagen IR. Para alcanzarlo, como se indicó en el capítulo 1, necesitamos trabajar con imágenes en las bandas MIR y TIR, que tengan unas propiedades muy concretas: correlación temporal, espacial y radiométrica.

El primer paso para conseguir estas propiedades ha sido la construcción del espectrómetro de imagen IR (capítulo 3). La *correlación temporal* se logra con el sistema de adquisición que permite adquirir imágenes digitales simultáneas en ambas bandas (apartado 3.2.4). Para hacer posible la *correlación espacial*, se diseñó una plataforma específica de apuntamiento (apartado 3.2.5); mientras que el calibrado de las cámaras (sección 4.1) se ha realizado para disponer de la *correlación radiométrica*. El preprocesado se ha sido diseñado para conseguir estos dos últimos objetivos, y constará de los siguientes pasos:

- Separación de imágenes y eliminación de “píxeles malos”.
- Corrección geométrica: co-registración.
- Calibración radiométrica: obtención de mapas de radiancia y temperatura.

Para realizar este preprocesado ha sido necesario desarrollar programas específicos, para lo cual se ha utilizado un lenguaje de programación denominado IDL (*Interactive Data Language*) [IDL 99][Fanning 98][website 19]. Es un lenguaje interpretado sobre C, orientado al tratamiento de imágenes y de grandes volúmenes de datos. También se ha utilizado otra aplicación informática (desarrollada en IDL) para el tratamiento y visualización de imágenes, denominada ENVI (*ENvironment for Visualizing Images*) [ENVI 00][website 19].

4.2.1. Separación de imágenes y eliminación de “píxeles malos”

El sistema de adquisición de imágenes digitales diseñado permite la adquisición de secuencias conteniendo imágenes simultáneas en ambas bandas, como la mostrada en la figura 4.9. En ella se puede observar la imagen TIR en la zona superior y la MIR en la inferior. Como la imagen es de 12 bits (almacenada por tanto en 2 bytes), para visualizar la información relevante que en ella aparece se ha procedido a seleccionar la zona del histograma más apropiada.

Recordemos que la adquisición de imágenes mediante este sistema se realiza en una serie de *buffers* de memoria RAM, en cada uno de los cuales se adquieren dos imágenes simultáneas, una de cada banda IR. Estos *buffers* son almacenados en un fichero que contiene una secuencia con un número de imágenes igual al de *buffers* reservados, y cada una de estas imágenes contiene a su vez dos imágenes simultáneas en cada una de las bandas espectrales (figura 4.9).

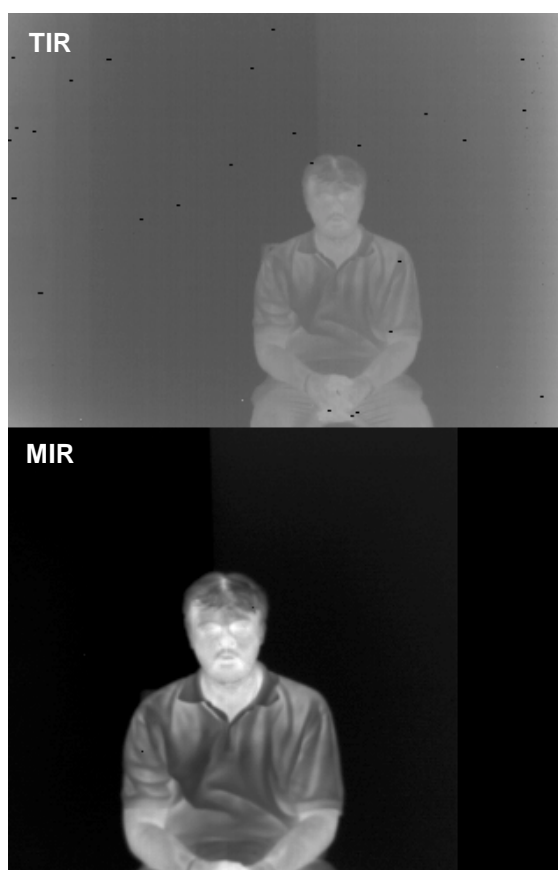


Figura 4.9. – Imagen biespectral IR extraída de una secuencia donde se muestra la organización de las imágenes TIR y MIR en un buffer del sistema de adquisición del espectrómetro de imagen en el IR construido. En la imagen TIR (superior), se aprecia la presencia de agrupaciones de “píxeles malos”.

Las dimensiones de cada buffer quedan fijadas por el sistema de adquisición, y son de 320x492 píxeles de 2 bytes (apartado 3.2.4). Como se puede observar no todo el *buffer* contiene información útil (figura 4.9): las cuatro últimas columnas de la imagen TIR no aportan información y la imagen real es de 316x236 píxeles; la imagen MIR de 256x256 píxeles se coloca inmediatamente debajo de la TIR, por ello aparece una zona oscura sin información a su derecha.

La primera operación que debemos hacer es la separación de las dos bandas, TIR y MIR, para posteriormente extraer las imágenes de cada una de las bandas dentro de la secuencia. Además se deben corregir los “píxeles malos” que aparecen en ambas imágenes:

- Imagen TIR. – Son píxeles que no responden ante la radiación incidente, “píxeles muertos” y su valor es constante e igual a cero siempre.
- Imagen MIR. – En este caso sólo existen dos en todo el *array*, pero a diferencia de lo que ocurre en el *array* de la cámara TIR, estos píxeles dan un valor anómalo dentro de la imagen distinto de cero y que además no siempre es el mismo.

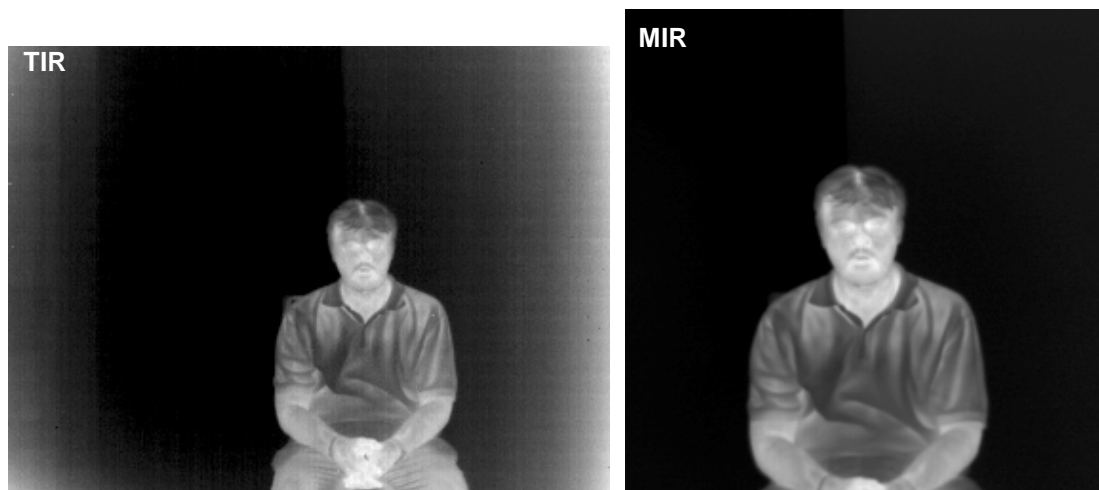


Figura 4.10. – Imagen TIR (izquierda) y MIR (derecha) una vez separadas y eliminados los “píxeles malos”. Se puede observar claramente el diferente campo de visión proporcionado por cada banda.

Para realizar la separación de las bandas, extracción de imágenes y almacenamiento final en archivos diferentes, se generó un programa que también elimina los “píxeles malos” que aparecen en ambas imágenes. La sustitución del ND de este tipo de píxeles se lleva a cabo procediendo inicialmente a su localización y posteriormente a la sustitución de su ND por el promedio de los vecinos más cercanos.

Las imágenes obtenidas después de aplicar este tratamiento se pueden ver en la figura 4.10.

4.2.2. Co-registración de imágenes MIR y TIR

Como se explicó en el apartado 3.2.5, las cámaras se han dispuesto en una plataforma rígida para que sus ejes ópticos estén permanentemente alineados. De este modo el centro del campo de visión de las cámaras coincide al realizar medidas a largas distancias. Pero, dado que los campos de visión de las cámaras son diferentes, como puede apreciarse en la figura 4.10, se necesita realizar en cada secuencia una *co-registración imagen a imagen* para conseguir una correspondencia *píxel a píxel*. Para ello, se deben definir una serie de puntos de referencia en ambas imágenes, denominados comúnmente en teledetección “puntos de control de tierra” (*Ground Control Points*, GCPs) [Mather 01]. Una vez localizados estos GCPs, se aplica un algoritmo que fuerza a la imagen con mayor campo de visión (en nuestro caso la imagen en el infrarrojo térmico), deformándola, para hacerla coincidir con la otra imagen, denominada imagen base (en nuestro caso la imagen en infrarrojo medio), que no es deformada. Naturalmente, la coincidencia sólo puede producirse en la región de la imagen deformada correspondiente al campo de visión de la imagen base. En lo sucesivo sólo se trabajará con esta región, que deberá extraerse de la imagen deformada.

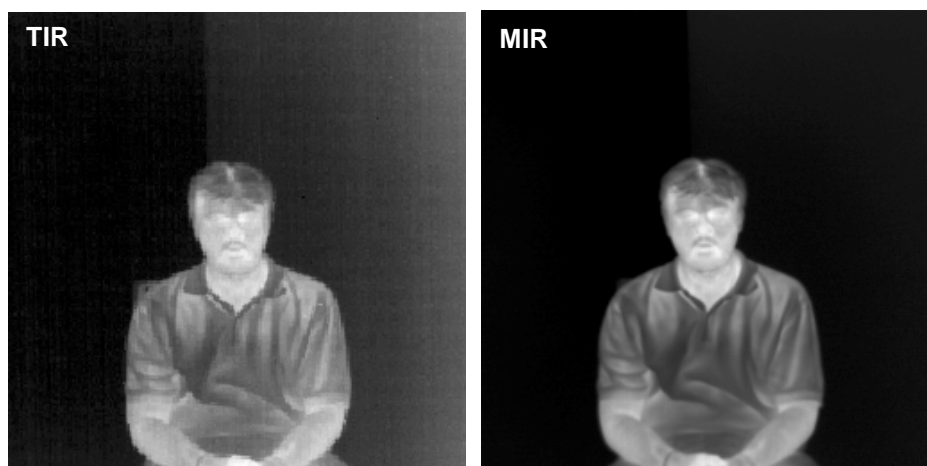


Figura 4.11. – Resultado de la co-registración de la imagen TIR (izquierda) a partir de la MIR (derecha).

El algoritmo aplicado para la co-registración se basa en un polinomio de primer grado para deformar la imagen y donde el valor del ND de cada píxel de la imagen co-registrada es remuestreado por el vecino más cercano sin realizar ninguna interpolación

[Mather 01][Campbell 96][Schott 97]. El resultado de la co-registración se puede apreciar en la figura 4.11.

Una vez co-registradas las imágenes, existe entre ellas una correlación espacial que nos va a permitir aplicar técnicas de procesamiento “píxel a píxel” para obtener información que de otro modo sería imposible de conseguir, como veremos en próximos capítulos.

4.2.3. Obtención de mapas de radiancia

El cálculo de la radiancia sin considerar los efectos atmosféricos de emisión-transmisión nos conduce a la obtención de *mapas de radiancia aparente*, es decir, la radiancia incidente en nuestro sistema o radiancia detectada. Para tal fin se ha desarrollado un programa que transforma el valor de ND de cada píxel en su valor de radiancia en $\text{W/m}^2 \cdot \text{sr}$. Para realizar esta conversión es necesario conocer la configuración de la medida, es decir, la atenuación y el tiempo de integración empleado. Una vez conocidos estos datos sabemos el valor de los parámetros de ganancia y *offset* de cada cámara (apartado 4.1.2) y utilizando la expresión [2.89] para la imagen de cada banda espectral, podemos calcular la radiancia detectada en cada banda $L_D (T_{\text{obj}})$,

$$L_D (T_{\text{obj}}) = [\text{ND} - \text{Offset}_{\text{cam}}] \cdot \text{Gain}_{\text{cam}}^{-1} \quad [4.9]$$

Las imágenes que estamos utilizando para mostrar el preprocesado están tomadas a muy corta distancia, a unos 2 metros, por tanto al trabajar en ventanas atmosféricas y a cortas distancias, las correcciones atmosféricas pueden despreciarse. Por otra parte, al no haber fuentes externas (las imágenes se han tomado en laboratorio), podemos despreciar la radiación ambiente reflejada en el objeto (ya que la emisividad de la piel humana es prácticamente la unidad $\epsilon_{\text{piel}} \approx 0.98$ [Hudson 69]), podemos concluir que, para este caso, la radiancia aparente coincidirá con la radiancia emitida por el objeto.

Aplicando esta expresión, a través del programa desarrollado, a las imágenes de la figura 4.11 obtenemos los mapas de radiancia que se muestran en la figura 4.12. En ambas imágenes se ha insertado una escala de niveles de gris con los valores de radiancia integrada para cada banda, que como vemos, son bastante diferentes, más elevados en la banda TIR ya que las temperaturas de la escena son cercanas a la temperatura ambiente.

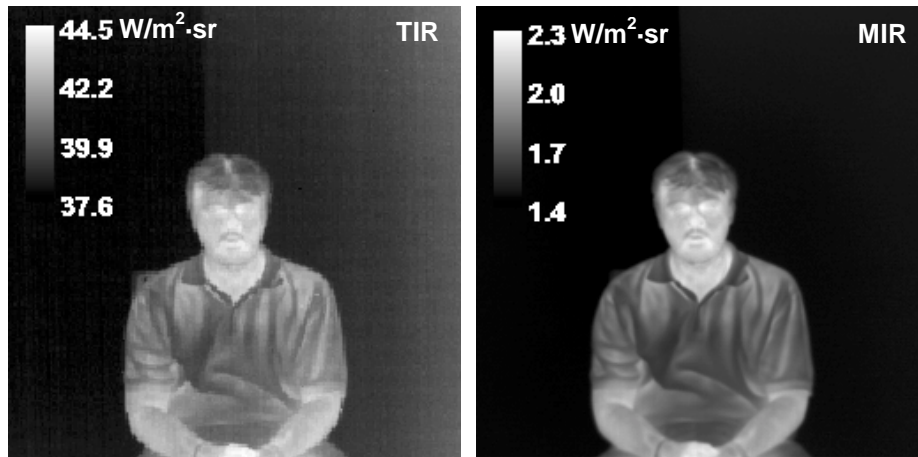


Figura 4.12 . – Mapas de radiancia obtenidos para las imágenes co-registradas en el infrarrojo térmico (izquierda) y medio (derecha). En cada una de ellas se muestra una escala para apreciar la diferencia de los valores de radiancia integrada obtenidos para cada banda.

Para calcular la radiancia emitida por el objeto a grandes distancias, debemos tener en cuenta la transmisión atmosférica, cuya influencia dependerá de las condiciones ambientales de temperatura y humedad y será diferente para cada banda. El cálculo de la transmitancia atmosférica promedio en cada banda, conocidos los parámetros ambientales y la distancia al objeto, se realiza mediante MODTRAN [Ontar 96]. Así, la radiancia emitida, en ausencia de fuentes externas y despreciando la influencia del ambiente se obtendría mediante la expresión,

$$L_{\text{obj}}(T_{\text{obj}}) = L_D(T_{\text{obj}}) \cdot \tau_{\text{atm}}^{-1} = [\text{ND} - \text{Offset}_{\text{cam}}] \cdot \text{Gain}_{\text{cam}}^{-1} \cdot \tau_{\text{atm}}^{-1} \quad [4.10]$$

La emisión atmosférica es necesario considerarla en medidas a grandes distancias si su emisión es apreciable frente a la del objeto que se esté midiendo.

4.2.4. Obtención de mapas de temperatura

Los mapas de radiancia contienen toda la información radiométrica proporcionada por las cámaras. Sin embargo, para correlacionar esta información de las bandas MIR y TIR es más conveniente trabajar en temperaturas. Esta magnitud física debería tener el mismo valor en ambas bandas, sin embargo, la *temperatura de brillo* obtenida en las bandas MIR y TIR, para cuerpos o fenómenos cuya emisividad varía fuertemente con la longitud de onda no cumple esta condición. Es precisamente esta peculiaridad, la que nos proporcionará la información clave para optimizar los procesos de detección en el IR, como veremos más adelante.

La temperatura de brillo aparente, (es decir, la temperatura sin realizar la corrección debida a la transmitancia atmosférica y a la emisividad del cuerpo de que se trate) puede obtenerse a partir de la radiancia (expresión 2.93), o directamente del número digital (ecuación 2.94):

$$T_{\text{bobj}}^{\text{ap}} = \frac{B}{\ln\left(\left(\frac{R \cdot \text{Gain}_{\text{cam}}}{\text{ND} - \text{Offset}_{\text{cam}}}\right) + F\right)} \quad [4.11]$$

(obviamente, es necesario conocer la configuración de medida que define Gain_{cam} y $\text{Offset}_{\text{cam}}$, y los parámetros de la función de calibrado de la cámara).

Esta temperatura coincidirá con la temperatura real del objeto T_{obj} , a cortas distancias cuando se pueda considerar la transmitancia atmosférica igual a la unidad ($\tau_{\text{atm}} = 1$), y para un cuerpo negro. En ausencia de fuentes externas y despreciando los efectos del ambiente, podemos corregir el efecto de la atmósfera mediante una transmitancia promedio para la banda espectral de trabajo (calculada mediante MODTRAN). Obtenemos así la *temperatura de brillo* del objeto T_{bobj} . Teniendo en cuenta [4.10] la expresión anterior quedará,

$$T_{\text{bobj}} = \frac{B}{\ln\left(\left(\frac{R \cdot \text{Gain}_{\text{cam}} \cdot \tau_{\text{atm}}}{(\text{ND} - \text{Offset}_{\text{cam}})}\right) + F\right)} \quad [4.12]$$

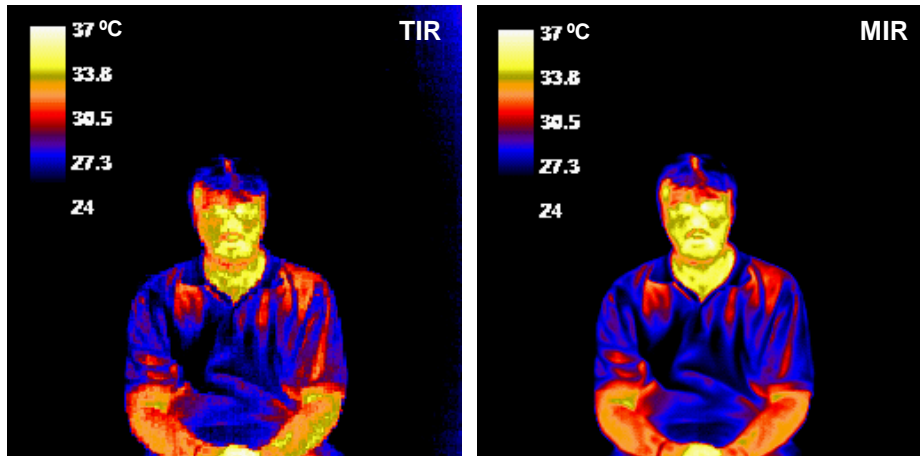


Figura 4.13. – Mapa de temperaturas de brillo para las imágenes TIR y MIR simultáneas y co-registradas. La escala de la paleta de colores utilizada permite ver que las temperaturas obtenidas son iguales en ambas bandas para las zonas del rostro, que corresponden al centro de la imagen.

En las imágenes que estamos utilizando para ilustrar el preprocesado la distancia al objeto es pequeña, y nos basta con utilizar la expresión [4.11]. El resultado de aplicar

esta expresión, mediante un programa desarrollado a tal efecto, a las imágenes de la figura 4.11, se muestra en la figura 4.13. Además, en este caso, dado el comportamiento de la piel humana en el IR, las temperaturas de brillo en ambas bandas son prácticamente iguales.

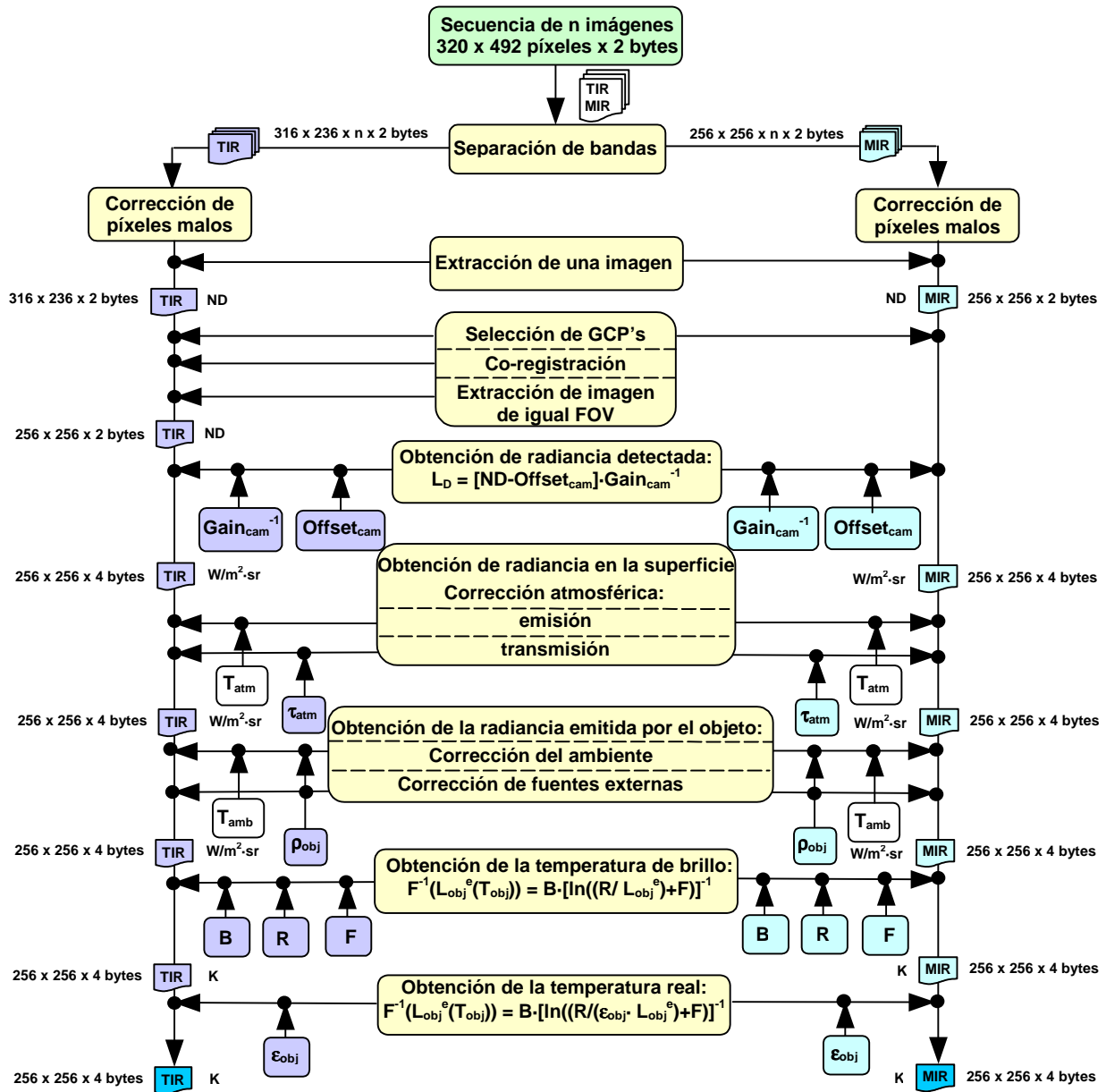


Figura 4.14. – Diagrama de flujo del preprocesado general para la obtención de mapas de radiancia y temperatura a partir de las imágenes MIR y TIR adquiridas mediante el espectrómetro biespectral de imagen en el IR construido.

El preprocesado aplicado a las imágenes utilizadas como ilustración en este capítulo, se ha simplificado porque hemos realizado las siguientes consideraciones:

- Transmitancia atmosférica, $\tau_{\text{atm}} = 1$. – Las imágenes han sido tomadas a muy corta distancia, de manera que al trabajar en ventanas atmosféricas esta suposición puede considerarse válida.
- Emisión atmosférica despreciable. – Al ser la distancia objeto tan pequeña se puede considerar despreciable esta contribución a la medida.
- No existen fuentes externas. – La medida fue tomada en laboratorio en ausencia de fuentes externas que pudiesen reflejar en el objeto.
- Influencia del ambiente. – La temperatura ambiente en el laboratorio donde se realizó la medida era mucho más baja que la del objeto, que además tiene una elevada emisividad. Por tanto, la reflexión del ambiente también puede considerarse despreciable en este caso.

Cuando no se pueden realizar todas estas simplificaciones, el preprocesado necesario para obtener un mapa de radiancias o temperaturas, es más complejo y se esquematiza en el diagrama de flujo de la figura 4.14.

4.2.5. Preprocesado para las imágenes del espectrómetro de alta resolución

Las imágenes hiperespectrales adquiridas con el espectrómetro de alta resolución necesitan un preprocesado específico debido a los principios físicos y modo de operación en que se basa este espectrómetro de imagen y también debido al sistema de adquisición utilizado (secciones 2.5.2 y 3.4.2).

En primer lugar, recordemos, que este sistema consta de un elemento dispersivo, acoplado a la cámara MIR, consistente en una óptica difractiva que a la vez se utiliza para enfocar la escena en las diferentes longitudes de onda, recorriendo el eje óptico accionada por un motor paso a paso. La posición de la óptica a diferentes distancias del detector para enfocar las diferentes longitudes de onda implica utilizar diferente focal, por lo que las imágenes hiperespectrales adquiridas tienen diferente FOV para cada longitud de onda, y por tanto no están co-registradas. Además según se vio en el apartado 3.4.2, la adquisición de las imágenes hiperespectrales genera dos ficheros: el fichero de imágenes propiamente dicho, y un fichero de datos con información sobre la medida generado por el software de control.

El procedimiento a seguir para preprocesar estas imágenes es el siguiente:

- Eliminación de “píxeles malos”. – Las imágenes son adquiridas con la cámara MIR, por tanto deberán ser reemplazados los píxeles malos que aparecen siguiendo el proceso indicado en el apartado 4.2.1.
- Corrección del FOV. – Estas imágenes, al estar tomadas con diferente focal, poseen campos de visión diferentes. Para corregir este efecto se utiliza un algoritmo de la aplicación de control de este sistema [HyPat II 01].

Una vez hecho este procesado, estamos en disposición de saber la longitud de onda de centrado de cada una de las bandas, sin más que extraer un espectro, con el programa HyPat II, de cualquier punto de la imagen cúbica.

Corregido el efecto del uso de diferente distancia focal para cada longitud de onda y conocida la longitud de onda de centrado de cada banda, podemos decir que disponemos de una imagen cúbica útil para realizar el procesado necesario para la aplicación en cuestión, utilizando cualquier otra aplicación informática o programa propio.

4.2.6. Análisis de componentes principales

En general se tiende a asumir que cuanto más bandas espectrales se utilicen para el estudio de un fenómeno éste se podrá abordar mejor. Sin embargo, cuando se trabaja con decenas o centenares de bandas se presentan dos problemas: el tiempo de procesado y sobre todo la alta correlación entre bandas [Schott 97].

Resulta entonces conveniente realizar transformaciones lineales para conseguir nuevos conjuntos de imágenes que condensen la información esencial (para una aplicación dada) en un número reducido de bandas [Richards 99]. A menudo, además estas transformaciones pueden hacer evidentes características que no eran perceptibles en las imágenes originales. Una transformación muy utilizada en teledetección es el *análisis de componentes principales* (*Principal Component Analysis*, PCA) [Richards 99][Schott 97][Kruse 88], que proporciona una serie de imágenes que contienen la misma información que las originales, pero entre las cuales no existe correlación. Está específicamente diseñada para descorrelacionar la información contenida en las imágenes maximizándola en un número reducido de bandas. La información de un píxel en una imagen cúbica se puede representar por las coordenadas de un vector, **ND**, en un espacio n-dimensional (donde *n* es el número de bandas), de forma que cada coordenada

representa el ND de dicho píxel en cada banda. En el *espacio multispectral* así definido [Richards 99], para cada una de éstas imágenes cúbicas representada en un diagrama de dispersión n -dimensional, le corresponde una nube de puntos. Por simplicidad nos referiremos aquí al caso de dos bandas, aunque los resultados son generales y aplicables a imágenes de n bandas.

Un conjunto de m píxeles en un diagrama de dispersión (para dos bandas espectrales i y j) se puede caracterizar por dos parámetros: el valor medio de sus coordenadas (ND_{iprom} , ND_{jprom}) y su dispersión dada por la matriz de covarianzas, Σ cuyos elementos σ_{ij} se calculan a partir de la expresión [4.13],

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{m-1} \sum_{l=0}^m (ND_i(l) - ND_{iprom})(ND_j(l) - ND_{jprom}) \quad [4.13]$$

Los elementos diagonales de la matriz de covarianza miden la dispersión de los ND en cada banda; los elementos no diagonales miden la correlación existente entre las bandas: si ésta es alta, los elementos fuera de la diagonal tendrán un valor elevado en relación a los de la diagonal, en caso contrario serán cercanos a cero. Suele definirse la matriz de correlación a partir de la matriz de covarianza mediante la expresión,

$$r_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sqrt{\sigma_{ii}\sigma_{jj}}} \quad [4.14]$$

En esta matriz los elementos de la diagonal son la unidad y los elementos fuera de la diagonal son los coeficientes de correlación entre las diferentes bandas.

La transformación de componentes principales es una transformación lineal en el espacio multispectral que proporciona un nuevo sistema de coordenadas, en el cual los datos de las nuevas bandas no tienen ninguna correlación, es decir, en el que la matriz de covarianza sea diagonal y cuyos elementos, ordenados de mayor a menor, serán la varianza en estos nuevos ejes (figura 4.15).

Se puede demostrar [Richards 99][Campbell 96] que siempre existe una transformación lineal dada por una matriz W_{CP} que aplicada sobre los vectores ND , realiza un cambio de base obteniéndose unos nuevos vectores (y por tanto nuevas imágenes):

$$CP = W_{CP} \cdot ND \quad [4.15]$$

de forma que en esta nuevo espacio o base vectorial, la matriz de correlación dada por [4.16] es diagonal,

$$\Sigma_{CP} = W_{CP} \cdot \Sigma \cdot W_{CP}^T \quad [4.16]$$

La matriz \mathbf{W}_{CP}^T tiene por columnas los autovectores de Σ . Es una matriz ortogonal, por lo que la transformación puede considerarse como un giro rígido de los ejes, de tal forma que los orienta según los ejes principales de la nube de puntos [Schowendgert 87]. La traza de la matriz de correlación, es decir la varianza total se conserva. Los nuevos ejes se ordenan de manera decreciente atendiendo al valor cada autovalor (varianza). Si la correlación entre bandas es alta, casi toda la varianza está en las primeras componentes principales, y las últimas pueden ignorarse. Sin embargo, y como veremos más adelante, a veces la información contenida en las últimas bandas es importante cuando se quiere detectar un fenómeno de intensidad y dimensión espacial pequeñas.

Por otra parte, incluso con un número reducido de bandas, al análisis de componentes principales reorganiza la información de un modo que puede ser muy útil. En la figura 4.15 se muestra un ejemplo de la reorganización de la información en el nuevo sistema de coordenadas obtenido mediante PCA respecto al original para dos bandas. Vemos que las agrupaciones píxeles que pueden verse separadas en el diagrama de dispersión, pero no en las proyecciones sobre los ejes originales (que corresponderían al histograma de cada banda), quedan completamente separadas en el nuevo sistema de ejes obtenido mediante PCA.

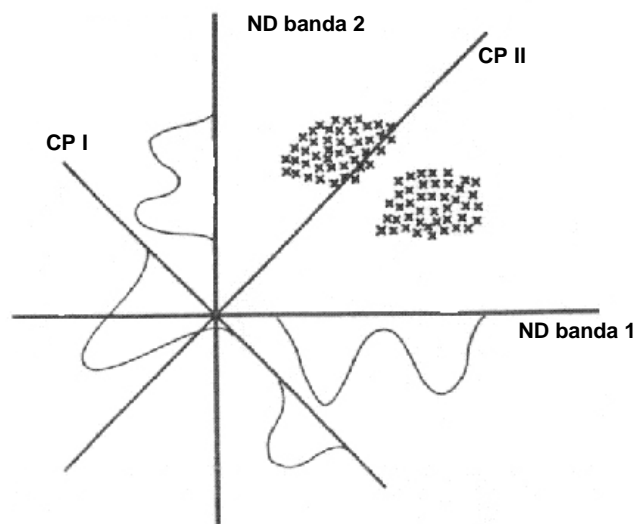


Figura 4.15. – Análisis de componentes principales efectuado para dos bandas espectrales, donde se puede apreciar el incremento notable en la separación de la información en el nuevo sistema de coordenadas obtenido mediante PCA (adaptada de [Schott 97]).

Las nuevas imágenes obtenidas al aplicarles esta transformación, serán combinación lineal de las originales, y estarán ordenadas de forma que la primera

contendrá la mayor dispersión de datos posible y las siguientes serán ortogonales a ésta. Además la correlación entre bandas en este nuevo sistema de coordenadas será, por definición, nula.

La utilización que haremos de esta transformación en los siguientes capítulos está orientada a descorrelacionar la información contenida en un número pequeño de bandas (2 ó 3 a lo sumo), y no para reducir el número de bandas a utilizar cuando trabajemos con imágenes hiperespectrales (capítulo 7). En este caso la elección de bandas se realizará en función de las características espectrales del fenómeno a detectar sobre un escenario determinado [Schott 97] y luego se aplicará PCA para determinar a partir de qué bandas originales la separabilidad del blanco respecto del fondo es la óptima.

Hay que señalar que la transformación de componentes principales depende de los datos: si cambia la escena, cambiará la matriz de correlación y por tanto sus autovalores, de modo que la transformación debe ser recalculada. En algunas circunstancias esto puede ser una ventaja, a pesar de su coste computacional, porque proporciona parámetros “adaptativos” que evolucionan con la escena. En particular, las imágenes de componentes principales son insensibles a las derivas que afectan a algunos equipos, como la cámara TIR utilizada. Esta deriva puede inutilizar algoritmos de alarma que estén basados en umbrales sobre la señal TIR, pero no si están basadas en los valores de las componentes principales.

4.3. Clasificación

Una vez realizado el preprocesado, dispondremos de imágenes biespectrales, en las bandas MIR y TIR, simultáneas, co-registradas y calibradas radiométricamente. El objetivo ahora es extraer de ellas el máximo de información. Un camino posible es recurrir a técnicas de clasificación, ampliamente utilizadas en teledetección desde satélite, aunque no habituales en la detección IR desde tierra. Uno de los atractivos de disponer de imágenes biespectrales es precisamente la posibilidad de emplear todo este arsenal de técnicas cuantitativas y bien establecidas. La clasificación puede hacerse usando exclusivamente los ND de los píxeles que forman la imagen (clasificación espectral) o puede recurrirse a la información espacial (como la textura) o temporal (comparando imágenes tomadas en diferentes instantes), e incluso información auxiliar

(como datos sobre el relieve de la escena) [Chuvieco 96]. Como nuestro objetivo es disponer de métodos rápidos y en lo posible automáticos, nos limitaremos a la clasificación espectral.

4.3.1. Planteamiento del problema de la clasificación

En general, el problema de la clasificación consiste en la asignación de los objetos o cuerpos que aparecen en un escenario a una serie de clases. Estas clases han sido previamente definidas en función de lo que se quiere detectar, y del escenario donde se llevará a cabo la detección. El objetivo por tanto es:

- Establecer un criterio para la asignación de esos objetos a una clase determinada, es decir, definir un *clasificador*.
- Evaluar su validez o rendimiento, comparándolo con otros clasificadores para finalmente elegir el que mejor se adapte a la resolución de nuestro problema.

En el caso de la teledetección, los objetos están formados por los píxeles de la imagen, y las clases son las diferentes categorías (por ejemplo, tipos de suelos, cultivos, etc.) en que se puede dividir la escena.

Para ilustrar el problema de la clasificación supongamos el caso más sencillo: una imagen en una sola banda en la que queremos distinguir dos clases que llamaremos A y B (por ejemplo, un escenario donde queremos localizar agua y por tanto definimos la clase “agua” (A) y el resto será otra clase “ausencia de agua” (B)). Al realizar la clasificación nos encontraremos con cuatro casos posibles:

- Píxeles clasificados como clase A (agua), que denotaremos con (+) y:
 - Que pertenezcan verdaderamente a la clase A, que denominaremos VP, verdaderos positivos, (en inglés, *hits*).
 - Que no pertenezcan realmente a la clase A. Los llamaremos FP, falsos positivos (*false alarms*).
- Píxeles clasificados como clase B (ausencia de agua), que denotaremos con (–) :
 - Que pertenezcan verdaderamente a la clase B, que denominaremos VN, verdaderos negativos (*correct rejections*).
 - Que no pertenezcan realmente a la clase B. Los llamaremos FN, falsos negativos (*misses*).

Por tanto, el total de los píxeles clasificados como clase A serán, $(+) = VP + FP$, y el total de píxeles clasificado como clase B será, $(-) = VN + FN$. Los píxeles que realmente pertenecen a una y otra clase son: $A = VP + FN$; $B = FP + VN$.

Para ilustrar estos resultados podemos construir una *tabla de contingencia*, también llamada *matriz de confusión* (figura 4.16). En dicha tabla se utilizan las siguientes definiciones:

- *Valor predictivo positivo*, que es la proporción de píxeles clasificados correctamente como A, respecto a todos los clasificados como A.
- *Valor predictivo negativo*, que indica la proporción de píxeles clasificados correctamente como B, sobre todos los clasificados como B.
- *Sensibilidad o probabilidad de detección*, definida como la fracción de píxeles de la clase A correctamente clasificados en la clase A.
- *Especificidad* definida como la fracción de píxeles de la clase B, correctamente clasificados en la clase B. La *probabilidad de falsa alarma* es la fracción de píxeles de la clase B clasificados (incorrectamente) como A; por tanto, es igual a la unidad menos la especificidad.

		Clase real		
		A	B	
T e s t	+	VP	FP	Validez (Accuracy) = $(VP + VN)/(A + B)$ Valor predictivo positivo = $VP/(+)$
	-	FN	VN	Valor predictivo negativo = $VN/(-)$

Sensibilidad = VP/A **Especificidad = $(1 - \text{Probabilidad de Falsa Alarma}) = VN/B$**

Figura 4.16. – Tabla de contingencia o matriz de confusión.

A veces se utiliza un solo parámetro para caracterizar el clasificador, la exactitud global, validez o *accuracy*, definida como la suma de píxeles clasificados correctamente como una u otra clase respecto a la suma de píxeles que realmente componen esa clase.

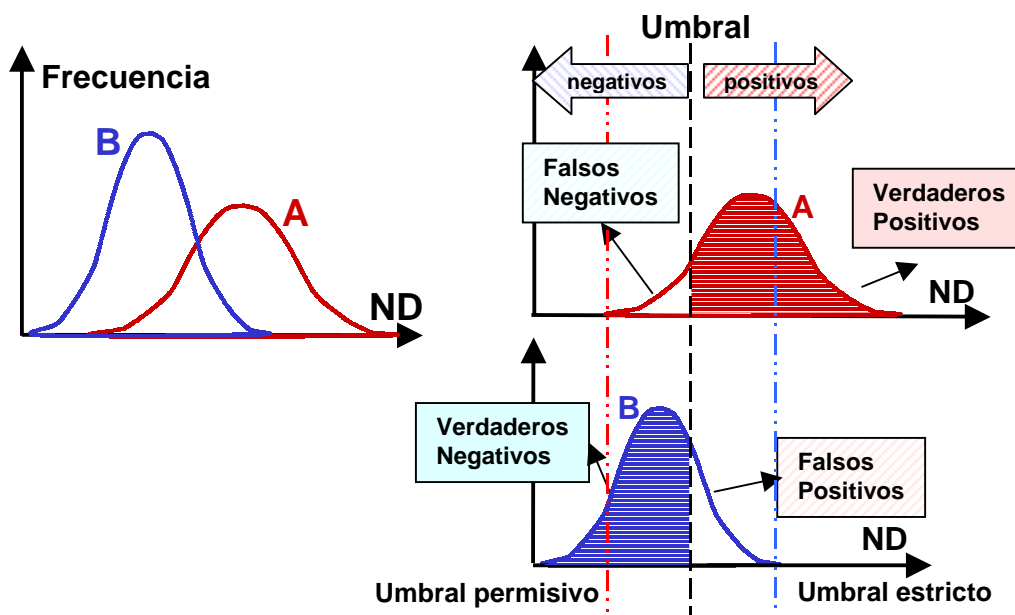


Figura 4.17. – Resultados de un clasificador basado en un umbral: compromiso entre sensibilidad y especificidad.

El clasificador ideal sería aquel en el que la probabilidad de detección fuese la unidad y la de falsa alarma nula. Tal cosa es imposible en la práctica y deberemos llegar a un compromiso entre ambas. Tomamos como ejemplo un clasificador basado en un umbral del nivel de gris o número digital (ND) para nuestro escenario hipotético (figura 4.17), donde la distribución de los valores de nivel de gris de ambas clases, se solapan como suele ser habitual. Al fijar un valor para el umbral tendremos una serie de píxeles que quedaran mal clasificados, es decir, tendremos falsos positivos o falsas alarmas, y falsos negativos que serán en nuestro caso zonas de agua no detectadas. Si decidimos utilizar un umbral más permisivo (movemos el umbral hacia la izquierda) la probabilidad de detección aumentará notablemente, pero también lo hará la tasa de falsas alarmas. Por el contrario, al colocar un umbral más estricto la tasa de falsas alarmas disminuye, pero a costa de disminuir la probabilidad de detección. El compromiso a establecer entre sensibilidad y especificidad dependerá de factores externos, en particular, del coste relativo que conlleven los errores de omisión (falsos negativos) frente a los errores de comisión (falsos positivos).

Curvas ROC

Toda la gama de posibles compromisos entre probabilidad de detección y probabilidad de falsa alarma para un problema de detección dado se puede representar mediante una

curva ROC (del inglés *Receiver Operating Characteristics*⁴). Una curva ROC es una gráfica de la probabilidad de detección frente a la probabilidad de falsa alarma, para los distintos umbrales posibles.

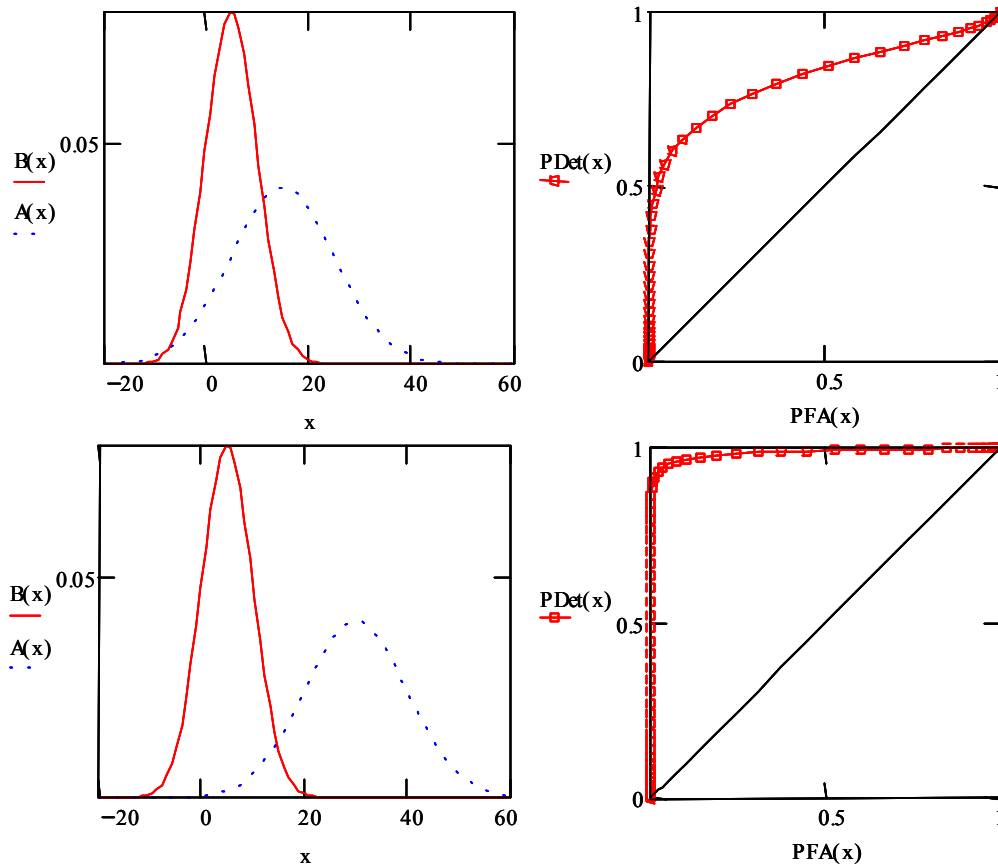


Figura 4.18. – Curvas ROC para dos separaciones diferentes de las clases A y B.

En la figura 4.18 se dibujan las curvas ROC (derecha) para dos separaciones diferentes de las distribuciones de las clases A y B (izquierda). Con un umbral muy permisivo (en torno a -10), la probabilidad de detección (PDet) es casi 1 pero también es muy elevada la probabilidad de falsa alarma (PFA). Al aumentar el umbral, tanto PDet como PFA disminuyen, pero en el caso de abajo, debido a la separación de las distribuciones, se alcanzan PDet altas con PFA muy bajas. En el caso de arriba, las distribuciones son menos separables, lo que se traduce en que la curva ROC es menos abombada y queda más lejos del punto (0,1) que correspondería al clasificador ideal [Wilmot 93][Provost 97]. El caso de distribuciones idénticas, imposibles de separar, la curva degenera en la diagonal, $PDet = PFA$.

⁴ El nombre se remonta al uso de estas curvas para describir las características operativas de los equipos de radar.

4.3.2. Relación entre valores predictivos y probabilidad de detección

Para diseñar un clasificador debemos aplicarlo a imágenes de las que sabemos a que clase pertenece cada píxel (es lo que se denomina generalmente en teledetección *ground truth*, o *verdad-terreno* [Pinilla 95])

Al aplicar el clasificador a estas imágenes medimos la probabilidad de detección y la de falsa alarma e intentamos optimizarlo. Pero los valores que realmente miden la bondad o rendimiento del clasificador en su utilización real (sobre imágenes en las que desconocemos el *ground truth*) son los valores predictivos, tanto el positivo como el negativo. Es decir, queremos saber qué porcentaje de los píxeles clasificados como agua (o no agua) son verdaderamente agua (o ausencia de agua).

En otras palabras, al diseñar el clasificador medimos la probabilidad de detección, es decir, la probabilidad de que un píxel de la clase A sea clasificado como positivo, que denotaremos $P(+|A)$. Pero al utilizar el clasificador lo que nos interesa conocer el valor predictivo positivo, es decir, la probabilidad de que un píxel clasificado como positivo en el test $P(A|+)$, sea realmente de la clase A. Denotaremos esta probabilidad como $P(A|+)$.

Para encontrar esta relación desarrollamos la expresión del valor predictivo positivo,

$$VPP = \frac{VP}{(+)} = \frac{\frac{VP}{VP + FN} \cdot \frac{VP + FN}{A + B}}{\frac{(+)}{A + B}} = \frac{PDet \cdot \frac{A}{A + B}}{\frac{(+)}{A + B}} \quad [4.17]$$

Cambiando a la notación más utilizada en la teoría de probabilidad: $VPP = P(A|+)$; $PDet = P(+|A)$; $A/(A+B) = P(A)$ y $(+)/(A+B) = P(+)$; y donde $P(A)$ es la probabilidad de que un píxel sea de la clase A, y $P(+)$ es la probabilidad de que un píxel dé positivo en el test, es decir, sea clasificado como clase A. Obtenemos:

$$P(A|+) = \frac{P(+|A) \cdot P(A)}{P(+)} \quad [4.18]$$

Vemos por tanto, que la relación existente entre el valor predictivo positivo (negativo) y la probabilidad de detección (de falsa alarma), es precisamente el conocido *Teorema de la probabilidad de Bayes*.

4.3.3. Clasificación por máxima verosimilitud

Dado que la clasificación es esencialmente un proceso de toma de decisiones con datos que muestran una considerable variabilidad estadística, deberemos contar con las herramientas matemáticas de la teoría estadística de la decisión o probabilidad. En el mejor de los casos, la decisión de clasificar un píxel en una determinada clase es una suposición estadística inteligente que tendrá cierta probabilidad de error.

El método de clasificación por máxima verosimilitud (*maximum likelihood*) se basa en el teorema de Bayes. Para decidir si un determinado píxel cuyo número digital tiene un cierto valor “x” pertenece a la clase A, utiliza la expresión [4.18]:

$$P(A | x) = \frac{P(x | A) \cdot P(A)}{P(x)} \quad [4.19]$$

Esta expresión se aplica a las diversas clases, y se asigna el píxel a aquella que tiene una mayor probabilidad. No obstante, para calcular esta probabilidad “a posteriori” de que un píxel de valor x pertenezca a una clase es más práctico utilizar la expresión:

$$\frac{P(A | x)}{P(B | x)} = \frac{F_A(x) \cdot P(A)}{F_B(x) \cdot P(B)} \quad [4.20]$$

donde hemos escrito $F_A(x) \equiv P(x | A)$ y $F_B(x) \equiv P(x | B)$; $F_A(x)$ y $F_B(x)$ representan las *funciones de distribución de densidad de probabilidad*⁵ de las clases A y B, respectivamente, que se suponen conocidas en la fase de diseño (o “entrenamiento” del clasificador).

También se deben conocer las probabilidades “a priori” de que un píxel pertenezca a una u otra clase, $P(A)$ y $P(B)$. Estas probabilidades se estimarán de la abundancia de cada clase en la imagen (si esto no es posible, en la práctica a menudo se suponen todas iguales; sin embargo, diversos autores han verificado que una estimación de las probabilidades a priori, aunque sea grosera, mejora notablemente los resultados de la clasificación) [Chuvieco 96][Schott 97][Campbell 96].

Para clasificar un píxel en una u otra clase se elegirá la opción más verosímil. Por tanto, para que el píxel pertenezca a la clase A, deberá ocurrir que:

$$P(A | x) > P(B | x) \Leftrightarrow F_A(x) \cdot P(A) > F_B(x) \cdot P(B) \quad [4.21]$$

Para aplicar este clasificador a una imagen, el principal problema es encontrar las funciones de distribuciones de las clases. Estas funciones se pueden calcular

⁵ El nombre correcto es el indicado, “función de distribución de densidad de probabilidad”, pero será abreviado por “funciones de distribución”.

mediante el “entrenamiento” con regiones de interés (ROIs, *Regions Of Interest*) representativas de dichas clases. En casos donde se puede asumir que las funciones de distribución son gaussianas, quedan completamente definidas por su valor medio y su desviación estándar y el proceso de entrenamiento consiste simplemente en obtener estos parámetros ajustando por gaussianas las funciones de distribución de las ROIs. Conviene las ROIs elegidas para definir las clases sean pequeñas y evitar las zonas de borde donde puedan mezclarse clases. Generalmente es aconsejable elegir más de una región de interés para definir cada una de ellas [Campbell 96]. Con la aproximación gaussiana, la probabilidad de que un píxel que pertenezca a la clase A tenga el valor x , es decir, su función de distribución, quedará definida por,

$$P(x|A) = F_A(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_A} \exp\left[-\frac{(x - ND_{Aprom})^2}{2\sigma_A^2}\right] \quad [4.22]$$

Donde ND_{Aprom} , es el promedio del número digital para la clase A y σ_A su desviación estándar. Por tanto, sustituyendo la expresión [4.22] en [4.21], y tomando logaritmos naturales podemos definir una “función distancia” [Schott 97]:

$$D_A = \ln[P(A)] - \ln(\sigma_A) - \left[\frac{(x - ND_{Aprom})^2}{2\sigma_A^2}\right] \quad [4.23]$$

de modo que cuando la distancia de un píxel a una clase es mínima, su probabilidad de pertenecer a ella es máxima. Assignaremos por tanto el píxel a la clase más cercana.

Si las clases son realmente gaussianas y conocemos sus valores de ND_{prom} y σ , este criterio es el óptimo, pero es necesario insistir en la importancia de la elección de las clases para que su función de distribución se asemeje a una gaussiana. Si elegimos alguna clase cuya función de distribución es bimodal deberíamos separarla en dos unimodales para que el algoritmo funcione correctamente. Si la función de distribución de probabilidad no es una gaussiana los cálculos se complican enormemente, pero el método que minimiza los errores en la clasificación sigue siendo maximizar la probabilidad a posteriori dada por el teorema de Bayes (expresión [4.19]).

Divergencia transformada

Para cuantificar la separabilidad de las clases de entrenamiento no basta con estudiar la separación entre las medias para una banda determinada, sino que habrá que determinar el grado de solapamiento que pueda existir y para ello deberá tenerse en cuenta la desviación estándar de cada distribución. Para calcular esta separabilidad existen varios

criterios que se detallan en [Richards 99]. La *divergencia* d_{ij} es una medida del solapamiento de las funciones de distribución F_i, F_j , definida por la expresión,

$$d_{ij} = \int_x [P(x|F_i) - P(x|F_j)] \ln \frac{P(x|F_i)}{P(x|F_j)} dx \quad [4.24]$$

donde x , es el valor de cada píxel. Es inmediato que la divergencia es definida positiva, que $d_{ij} = d_{ji}$ y que cuando las funciones de distribución son iguales $d_{ij} = 0$.

Cuando la separación entre clases aumenta, la probabilidad de clasificar correctamente tiende asintóticamente a uno. Sin embargo, la divergencia aumenta cuadráticamente con la separación. Con el fin de que la medida de separación entre clases tienda también a saturarse con la distancia, suele trabajarse con la *divergencia transformada*, d^T , definida a partir de la divergencia mediante la expresión,

$$d_{ij}^T = 2 \left(1 - e^{-d_{ij}/8} \right) \quad [4.25]$$

El valor de la divergencia transformada para dos clases cuya separabilidad es alta tiende a 2, como se desprende de las anteriores expresiones, indicando una buena elección de las mismas para realizar la clasificación⁶.

Lo que hemos expuesto hasta aquí puede *generalizarse para el caso de n bandas*: las funciones de distribución ahora estarán definidas en un espacio n -dimensional, y las gaussianas quedan definidas por un vector de medias o espectro que para la clase A será M_A (de n elementos, en lugar de un único valor ND_{prom}), y una matriz de covarianza S_A (de $n \times n$ elementos, en lugar de un único valor de σ), pero la complicación matemática no reviste dificultad conceptual, y se llega a una ecuación completamente análoga a [4.23], que será la distancia que debemos minimizar para que la probabilidad sea máxima y un píxel X sea asignado a la clase A ,

$$D_A = \ln[p(A)] - \frac{n}{2} \ln(2\pi) - \frac{1}{2} \ln|S_A| - \frac{1}{2} (X - M_A)^T S_A^{-1} (X - M_A) \quad [4.26]$$

donde $|S_A|$, es el determinante de la matriz de covarianza para la clase A y cuyos elementos para las bandas espectrales i y j están definidos por:

$$\sigma_{Aij} = \sum_{q=1}^N \frac{(ND_{Ai}(q) - ND_{Ai prom})(ND_{Aj}(q) - ND_{Aj prom})}{N - 1} \quad [4.27]$$

⁶ Hay otras posibles transformaciones de la divergencia que se saturan para grandes separaciones; se utiliza la ecuación [4.25] por analogía con la distancia de *Jeffries-Matusita* [Richards 99], otra medida de separabilidad.

donde N es el número de píxeles de la muestra [Schott 97].

La definición de divergencia transformada también se generaliza trivialmente para el caso de n bandas. Se puede demostrar que para distribuciones gaussianas [Richards 99],

$$d_{ij} = \frac{1}{2} T_r [(\Sigma_i - \Sigma_j) (\Sigma_i^{-1} - \Sigma_j^{-1})] + \frac{1}{2} T_r [(\Sigma_i^{-1} + \Sigma_j^{-1}) (\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_j) (\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_j)^T] \quad [4.28]$$

donde T_r es la traza de la matriz correspondiente y Σ_i y \mathbf{m}_i son la matriz de covarianza y el vector de medias para la clase i .

Simplificación del método de máxima verosimilitud

Hay que señalar que en ocasiones se utilizan versiones simplificadas del método de máxima verosimilitud. En todos los casos se ignoran las probabilidades a priori, desapareciendo el término $\ln[p(A)]$ de [4.23] y [4.26]. Además [Richards 99]:

- Si se asume que todas las clases tienen la misma matriz de covarianza, en la expresión [4.23] se puede prescindir de $\ln(\sigma_A)$ (de $\ln|S_A|$ en [4.26]); la distancia D_A se convierte en la distancia euclídea al cuadrado pesada por la desviación típica (en el caso n -dimensional por la matriz de covarianza). Es lo que se denomina *Distancia de Mahalanobis*.
- Si además ignoramos las desviaciones típicas, tenemos la clasificación basada en la *Distancia Euclídea*⁷.
- Finalmente, podemos “desacoplar” las diferentes bandas y establecer intervalos independientes alrededor de ND_{prom} en cada banda, asignando a cada clase los píxeles contenidos en esos intervalos, y dejando sin clasificar los que queden fuera. En esto consiste el *clasificador paralelepípedo*.

La principal ventaja de estos clasificadores frente al de máxima verosimilitud es su mayor rapidez por la necesidad de menores recursos de cálculo.

Se ha demostrado, por otra parte, que el factor crítico para la clasificación es la definición de las clases (el “entrenamiento”), más que el método de clasificación utilizado [Scholz 79] [Hixson 80].

⁷ En una dimensión los resultados son equivalentes a los de Mahalanobis, porque en esta última se suponen las matrices de covarianza todas iguales, y lo único que se tiene en cuenta es la anisotropía pero en una dimensión no hay anisotropía.

Matriz de costes

Hasta ahora hemos estudiado la clasificación con el fin de conseguir maximizar el valor predictivo positivo, pero éste no es siempre el objetivo prioritario. Los errores de clasificación no tienen porque ser igual de importantes o “costosos” cuando ocurren en una clase o en otra. Es decir, el error de tener un falso positivo (falsa alarma) no tiene porque pesar lo mismo que el de un falso negativo (blanco no detectado) [Provost 97]. Un ejemplo obvio puede ser la detección de incendios, otro más drástico la detección de un misil, donde una alarma falsa puede implicar consecuencias irreparables.

En los casos de sistemas de detección de amenazas ligados a una toma de decisiones en que el error es de alto coste y en los que se considera que la probabilidad de existencia de la amenaza es muy baja se suele utilizar el criterio de Neyman-Pearson que consiste en definir la máxima PFA tolerable en el sistema y definir a partir de ella la máxima probabilidad de detección [Wilmot 93].

En general, será necesario evaluar, teniendo en cuenta los costes, qué es más conveniente, disminuir los casos de no detección (falsos negativos) a costa de incrementar el número de falsas alarmas (falsos positivos), o al contrario.

Para ello es útil construir una matriz de costes (figura 4.19, donde $C(-, A)$ es el coste de un falso negativo y $C(+, B)$ el coste de un falso positivo) evaluando cada caso e incluir dicha evaluación en nuestro criterio de clasificación. De forma que ahora el coste de clasificar como “A” será,

$$C_A(x) = C(+, B) F_B(x) P(B) + C(+, A) F_A(x) P(A) = C(+ | B) F_B(x) P(B) \quad [4.29]$$

y análogamente para B. Diremos que el píxel pertenece a la clase A cuando sea la opción de menos coste:

$$C_A(x) < C_B(x) \Leftrightarrow C(+, B) F_B(x) P(B) < C(-, A) F_A(x) P(A) \quad [4.30]$$

$C_{VP} \equiv C(+, A) = 0$	$C_{FP} \equiv C(+, B) > 0$
$C_{FN} \equiv C(-, A) > 0$	$C_{VN} \equiv C(-, B) = 0$

Figura 4.19. – Matriz de costes.

4.3.4. Generalización para k clases

Hasta aquí hemos utilizado para ilustrar el problema de la clasificación un ejemplo sencillo, pero en una aplicación real tendremos k clases, y por tanto la matriz de confusión ahora será del tipo que aparece en la figura 4.20. En dicha matriz cada coeficiente x_{ij} representa, el número de píxeles de la clase j clasificados como clase i . La sensibilidad y especificidad se convierten aquí en las “exactitudes del productor” y los valores predictivos en las “exactitudes del usuario”.

		Clase real (de referencia o Ground Truth)							
		C1	...	...	Cj	...	Ck	Total	Ex.Usuario
Clase presunta (por evaluar)	c1	x ₁₁			x _{1j}	...	x _{1k}	Σ _j x _{1j} = x ₁₊	x ₁₁ /x ₁₊
		
	c _i	x _{i1}	...	x _{ii}	x _{ij}	...	x _{ik}	Σ _j x _{ij} = x _{i+}	x _{ii} /x _{i+}
		
		
	ck	x _{n1}	...	...	x _{nj}	...	x _{kk}	Σ _j x _{kj} = x _{k+}	x _{kk} /x _{k+}
Total		Σ _i x _{i1} = x ₊₁	...		Σ _i x _{ij} = x _{+j}	...	Σ _i x _{ik} = x _{+k}	Σ _{ij} x _{ij} = x ₊₊	
Ex.Productor		x ₁₁ /x ₊₁			x _{ij} /x _{+j}		x _{kk} /x _{+k}		Σ _{ii} x _{ii} / x ₊₊

Total de píxeles

“Exactitud global”

Figura 4.20. – Matriz de confusión para k clases.

Ahora la matriz de costes también cambiará y teniendo en cuenta que tendremos k funciones de distribuciones con su probabilidad de ocurrencia P y siendo c_{ij} el coste de asignar un píxel de la clase j a la i (con $c_{ii} = 0$), tendremos una expresión del tipo:

$$C_i(x) = \sum_{j=0}^k c_{ij} F_j(x) P_j \quad [4.31]$$

para el coste de asignar el píxel x a la clase i . Clasificaremos el píxel x en la clase i que minimiza $C_i(x)$.

4.3.5. Clasificación supervisada y no supervisada

Hemos insistido en que una parte inicial de la clasificación consiste en determinar los parámetros estadísticos de las clases (generar vectores de medias y matrices de covarianzas). Para ello se utiliza una muestra de píxeles de identidad conocida elegidas

en regiones de interés sobre la imagen (“entrenamiento” del clasificador). A este método suele llamársele “clasificación supervisada”. Hay sin embargo, un enfoque alternativo para realizar la clasificación, llamado “clasificación no supervisada”.

Para apreciar la diferencia, conviene empezar por hacer una distinción entre las *clases informacionales* (categorías en las que el interprete quiere clasificar la escena, por ejemplos tipos de usos del suelo) y las *clases espectrales* (subconjuntos de píxeles de características espectralmente homogéneas). En el caso más sencillo, existe una correspondencia biunívoca entre ambas, pero es más frecuente que una clase informacional contenga varias clases espectrales [Chuvieco 96][Campbell 96]. Por ejemplo, la clase informacional “vegetación” puede estar compuesta de diversas subclases espectrales, que corresponderán a diferentes especies, diferentes estados de crecimiento, etc. El objetivo de la clasificación no supervisada es la identificación de clases espectrales (es decir, de grupos naturales razonablemente uniformes en cuanto a su ND en varias bandas). En el dispersograma n-dimensional estos grupos naturales aparecen como agrupaciones de puntos (*clusters*), relativamente separados unas de otras, aunque generalmente con cierto solapamiento. Mientras la clasificación supervisada genera mapas de clases informacionales, y para ello entrena el clasificador, la clasificación no supervisada genera mapas de clases espectrales, para lo cual tiene que identificar estas clases mediante algún algoritmo que evalúe la homogeneidad espectral e identifique los clusters [Campbell 96].

No puede decirse que uno de los enfoques sea superior al otro en todas las circunstancias. Por el contrario, cada uno tiene ventajas e inconvenientes. En la clasificación supervisada, podemos señalar las siguientes ventajas [Campbell 96]:

- El analista tiene el completo control de la clasificación y diseña las clases en función del objetivo y el tipo de escena.
- Se usan áreas de entrenamiento cuyas clases están perfectamente identificadas.
- Al usar esta clasificación el problema de asociar las categorías informacionales a las espectrales se resuelve en el proceso de entrenamiento de las clases.
- El operador puede detectar los errores cometidos en la elección de las clases de entrenamiento y corregirlos.

Los inconvenientes son:

- El analista impone la estructura de la clasificación sobre los datos.
- Las áreas de entrenamiento se definen sobre categorías informacionales que pueden no corresponderse bien con categorías espectrales.

- Una selección cuidadosa de las regiones de entrenamiento, para que sean representativas, es costosa en tiempo y en esfuerzo y exige un fidedigno conocimiento de la escena, que suele requerir información adicional, incluso medidas de campo.
- Este tipo de clasificación no es capaz de reconocer y representar categorías imprevistas que no hayan sido seleccionadas como regiones de entrenamiento.

En contraste, las ventajas de la clasificación no supervisada son:

- No es necesario un conocimiento a priori de la escena.
- El error humano se minimiza. El operador no impone la estructura de clasificación sobre los datos; se limita a elegir el número de clases (o selecciona el número mínimo y máximo de clases) y el programa actúa según un algoritmo predefinido.
- Se evita el trabajoso proceso de entrenamiento.

Los inconvenientes:

- A veces identifica clases espectralmente homogéneas dentro de la imagen, que no se corresponden a las clases informacionales.
- El analista tiene un control limitado sobre el menú de clases y sus identidades.
- Las propiedades espectrales de las clases informacionales específicas pueden cambiar con el tiempo (por ejemplo estado de crecimiento de las cosechas); es decir, que la relación entre las clases informacionales y espectrales no es constante.

En el capítulo 6 utilizaremos para clasificar imágenes biespectrales de incendios un método supervisado en el que estudiaremos dos variantes: la elección de las clases de entrenamiento mediante regiones de interés en la imagen y directamente sobre el espacio multiespectral (de dimensión dos en este caso).

Conclusiones del capítulo

En este capítulo se han descrito los principios que rigen las técnicas de clasificación de la escena, es decir, dada una imagen multiespectral, asignar cada píxel a una clase determinada. Asimismo se han revisado las técnicas de análisis más comunes para hacer dicha clasificación.

En el siguiente capítulo se estudiará y optimizará la detección de fenómenos de carácter espectral, como es el caso del fuego, a partir de imágenes biespectrales.

Posteriormente, en el capítulo 6 de esta memoria aplicaremos a estas imágenes técnicas de clasificación, para identificar las distintas regiones que se pueden encontrar en un escenario típico de un incendio (llama, rescoldo y frente de llama). Este estudio tiene una aplicación inmediata para la monitorización de incendios forestales.

Las técnicas de clasificación no supervisada son atractivas para intentar automatizar este proceso. Sin embargo, nuestros resultados han mostrado que no se encuentra una correspondencia fiable entre las clases espectrales, identificadas por algoritmos automáticos y las clases informacionales. Por el contrario, la identificación directa por un operador de las clases espectrales es aquí relativamente sencilla, ya que al tratarse sólo de dos bandas, la información disponible en el dispersograma es fácilmente interpretable. Esta cuestión se trata en la sección 6.1.

Finalmente en el capítulo 7, donde se aborda la optimización de la detección a partir de espectrometría de imagen de alta resolución en el MIR, se aplican técnicas de selección de las bandas adecuadas a partir de la extracción de características espectrales del objeto. Se utilizará el análisis de componentes principales para separar dicho objeto del fondo y se calcularán curvas ROC para diferentes escenarios.

Capítulo 5

Detección y análisis de incendios forestales I.

Imágenes de índices de fuego

Los incendios forestales son uno de los principales causantes de la degradación del medio ambiente, en particular en el área mediterránea a la que pertenece nuestro país [Vélez 00a]. La amenaza de la deforestación ha acrecentado el interés en la detección precoz de incendios forestales y en su monitorización, como ayuda a la extinción. Como veremos en la siguiente sección, las características espectrales de la emisión del fuego hacen que las técnicas de teledetección IR sean las más prometedoras en este campo [Stearns 86][Flannigan 86][Thomas 93][Thomas 96]. En los últimos 20 años estas técnicas han sido utilizadas tanto desde tierra como aerotransportadas por los servicios forestales de lucha contra incendios [Young 94]. Se han usado a menudo cámaras IR instaladas en torres de vigilancia sobre plataformas giratorias, pero su alto coste y su elevada tasa de falsas alarmas ha impedido su implantación generalizada. Por otra parte, también ha sido propuesto el uso de sensores IR no formadores de imágenes, pero más robustos y baratos [Ugarte 00], que pueden servir para la expansión de estas técnicas IR de detección desde tierra.

Las cámaras IR también han sido aerotransportadas desde aviones y helicópteros, pero estos sistemas, además de costosos, son inadecuados para una vigilancia permanente y la detección de fuegos incipientes. No obstante, se utilizan para la coordinación y monitorización en las tareas de extinción y también para la detección de reavivamiento de focos fuera del frente del incendio [Young 94][Martínez 00].

Hasta aquí nos hemos referido a técnicas IR a escala local. Hasta hace unos pocos años no existía ningún programa de satélites cuya principal misión fuese la detección y monitorización de incendios forestales. Sin embargo, se han venido utilizando las imágenes de sensores embarcados en diferentes satélites para realizar

estudios sobre masa forestal quemada, determinación de perímetros, elaboración de mapas de riesgo, etc. Este el caso del sensor AVHRR de los satélites meteorológicos NOAA [López S. 91][Fernández 97][Robinson 91], y del sensor ATSR del satélite ERS [website 20]. Las imágenes obtenidas por estos satélites meteorológicos no son adecuadas para la detección de fuegos incipientes debido a su baja resolución espacial (del orden de 1 km). Tampoco lo son las obtenidas de otros satélites lanzados más recientemente y con mejor resolución espacial, dentro de los denominados genéricamente *earthwatch*, donde se tiene el inconveniente de su largo tiempo de revisita, del orden de días (frente a unas horas en los meteorológicos).

Estos inconvenientes, junto con el problema de la saturación de los sensores cuando el incendio se ha declarado, hacen necesario el lanzamiento de satélites específicos cuyos sensores eviten la saturación y cuya resolución espacial y tiempo de revisita sean los idóneos para conseguir una detección temprana. La creciente preocupación por las dimensiones globales del problema de los incendios forestales (emisión de gases de invernadero, deforestación a gran escala, etc), junto al abaratamiento de la puesta en órbita de minisatélites han supuesto un impulso definitivo para varios proyectos de este tipo. Es el caso del satélite BIRD [website 2] (DLR, Alemania) lanzado a finales de 2001, el programa FUEGO [website 1] de la Unión Europea (fase previa de un programa que prevé poner en órbita de una constelación de 12 minisatélites para vigilar el área mediterránea con un tiempo de revisita de 15 minutos) o el FOCUS [website 3] (ESA) sensor cuya instalación en la estación espacial internacional (ISS) está prevista para 2002. En este contexto de uso cada vez mayor de los sensores IR en la lucha contra incendios forestales, es donde se enmarca nuestro estudio sobre las aportaciones que la espectrometría de imagen IR puede incorporar para optimizar los actuales procesos de detección, identificación y clasificación. En concreto, en este capítulo se propone un tipo de algoritmos (*índices de fuego*) basados en un análisis espectral muy simple de la escena. De esta forma se sientan las bases del desarrollo de sensores IR para la detección precoz con una baja probabilidad de falsas alarmas, bien de modo automático o bien mediante la asignación a cada píxel de un índice de probabilidad de incendio para una decisión posterior.

La futura utilización de satélites específicos para la detección de incendios forestales necesitará, por otra parte, una validación de dichas medidas por medio de sensores similares utilizados desde tierra o aerotransportados. Para estas tareas puede ser muy útil el espectrómetro de imagen desarrollado en este trabajo así como las

técnicas de detección, identificación y clasificación que se proponen en este capítulo y el siguiente.

5.1. Idoneidad de las técnicas IR para la detección de incendios forestales

Las temperaturas características de los incendios forestales (entre 700 y 1800 K [Robinson 91]) hacen esperar, en virtud de la ley de Planck, una fuerte emisión en la región del infrarrojo medio. Esta emisión, junto con la gran sensibilidad de los sensores IR, hacen que estos sean, en principio, los más indicados para la detección precoz de incendios forestales. También se debe destacar su capacidad para la detección de focos en condiciones de mala visibilidad por la presencia de humo, así como de rescoldos calientes que pueden ser focos de reavivamiento del fuego, tareas para las que los sensores visibles son inútiles. Sin embargo, es precisamente su alta detectividad la causa de la alta tasa de falsas alarmas que presentan los sistemas IR estándar, debido a los cambios bruscos del fondo, reflejos y dispersión solares, y a la variedad de emisores que pueden aparecer en un escenario infrarrojo típico de detección de incendios forestales.

Para comprender mejor el problema de la detección IR de incendios forestales, es necesario estudiar espectralmente la emisión de un incendio.

5.1.1. Caracterización espectral del fuego en un incendio forestal

La emisión IR producida por un incendio forestal tiene diferentes orígenes. En primer lugar los gases, que serán CO_2 y H_2O principalmente, y en menor medida CO , CH_4 y compuestos orgánicos volátiles, estos últimos de gran importancia en la inflamabilidad del combustible forestal [Hernando 00]. Hay que añadir también la emisión de sólidos, partículas, resto de material combustible, suelo caliente, rescoldo, etc. La caracterización espectral de esta emisión será la clave para conocer cual es el rango espectral adecuado para la detección de incendios y para evitar los problemas de saturación. En concreto, para la detección de fuegos incipientes es de vital importancia caracterizar la emisión de los precursores del mismo. En la figura 5.1, se muestra el espectro de emisión IR de la combustión de uno de los precursores del fuego en un incendio forestal, como puede ser la paja. Este espectro, que ya habíamos presentado en

la introducción, fue medido mediante un espectrorradiómetro IR por transformada de Fourier (FTIR), a unos 10 m de distancia, en una quema realizada en el “Túnel del Fuego”, perteneciente a las instalaciones del Laboratorio del Fuego del CIFOR-INIA (Centro de Investigaciones FOREstales - Instituto Nacional de Investigación y tecnología Agraria y Alimentaria) del Ministerio de Ciencia y Tecnología. El espectrorradiómetro está dotado de un detector MCT cuyo rango espectral de trabajo está comprendido entre $600 - 4500 \text{ cm}^{-1}$ ($2.2 - 16.7 \text{ }\mu\text{m}$) con una resolución espectral hasta 0.5 cm^{-1} y un FOV de 20 mrad [Briz 01].

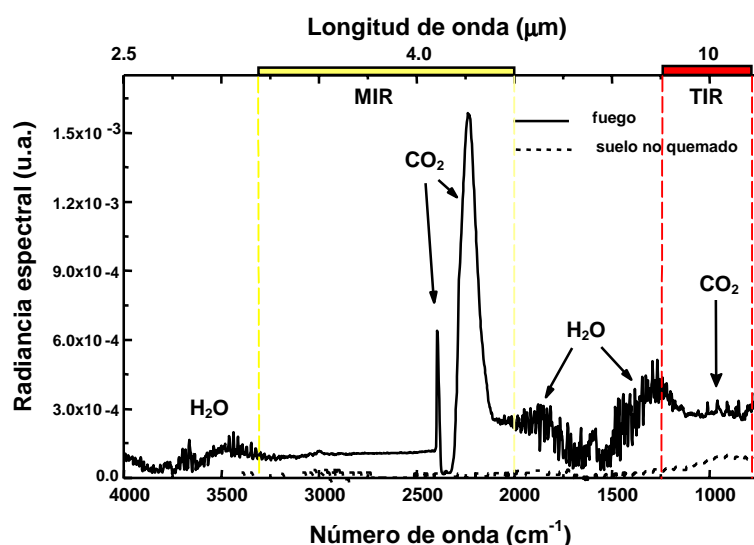


Figura 5.1. – Espectro de emisión IR de una quema de paja mostrando la emisión de gases y de suelo caliente (línea continua), frente a la emisión de suelo frío antes de la quema (línea discontinua) (adaptada de [Briz 01]).

El espectro de emisión de la quema de paja (línea continua) muestra una compleja estructura en la que se distinguen dos componentes: la *emisión de la llama*, debida a los gases (principalmente a la banda de CO_2) y un *continuo de emisión*, debida a los sólidos.

Debido a la absorción del CO_2 atmosférico, en la banda de emisión del CO_2 aparecen dos picos conocidos como *spikes* azul (centrado en $4.17 \text{ }\mu\text{m}$ (2400 cm^{-1})) y rojo (centrado en $4.48 \text{ }\mu\text{m}$ (2234 cm^{-1})). También se puede apreciar la emisión de H_2O en la región MIR aunque es claramente más débil que la de CO_2 . En la región TIR hay también emisión de CO_2 y H_2O , pero con intensidades mucho menores que en la región MIR¹.

¹ La identificación de otros posibles productos de la combustión como CO , CH_4 , etc, que poseen estructura fina, podría lograrse con espectros de alta resolución.

Los picos de los gases producto de la combustión sobresalen de un continuo de emisión debido al suelo y combustible calientes. Esta emisión se puede comparar con la del suelo frío antes de la quema (línea discontinua), lógicamente mucho más débil.

Dificultades en la detección IR de incendios forestales: Tasa de falsas alarmas y saturación

En resumen, el espectro de emisión de un fuego en estadio inicial muestra una fuerte dependencia de la emisividad con la longitud de onda, teniendo un máximo muy acentuado debido al CO₂ en una banda relativamente estrecha de la región MIR. Esta “firma espectral” del fuego tiene importantes consecuencias para su detección. En primer lugar las cámaras TIR serán poco sensibles a esta emisión: un suelo calentado por el sol o un cuerpo caliente pueden en ocasiones proporcionar una señal mayor en esta banda. Por otra parte, aunque las cámaras MIR sean más sensibles a la emisión del fuego, integran toda la radiación que les llega entre 3 – 5 μm , por lo que cuerpos a alta temperatura o reflejos solares pueden hacer que se detecte una irradiancia igual o superior a la producida por un fuego incipiente (ver sección 5.2). Estas falsas alarmas se dan con cierta frecuencia en el periodo de alto riesgo de incendios, que coincide lógicamente con los periodos de altas temperaturas que se dan en primavera y verano.

Por otro lado, una vez superado el estadio incipiente del fuego la fuerte emisión del CO₂ en la región MIR satura con facilidad los detectores, por lo que para adecuar una cámara MIR estándar para la monitorización de fuegos será conveniente atenuar la radiación que sobre ella incide, como veremos en las siguientes secciones. Este problema de saturación es el que presentan los satélites no específicos (meteorológicos o de estudio de la Tierra) cuando utilizan bandas en la región MIR para el estudio y monitorización de incendios ya declarados, debido a que están diseñados para el estudio de fenómenos, a temperaturas en torno a la ambiente, cuya emisión es pequeña comparada con la producida por un incendio.

5.2. Índice de fuego intrabanda en el IR medio

El problema de las falsas alarmas en la detección de incendios forestales tiene cierta analogía con los problemas que plantea la identificación de materiales en teledetección. En análisis composicional y de búsqueda de recursos, donde existen una

gran variedad de componentes, esta identificación necesita una gran resolución espectral y se lleva a cabo mediante sensores multispectrales e hiperspectrales [Clark 84][Kruse 95][*website* 6]. Sin embargo, para identificar los componentes de una mezcla de dos o tres gases sólo se necesitan unos pocos canales o bandas, uno por cada gas y otro más de referencia [López 92][López 94][Meléndez 95]. Por tanto, asumiendo que la *huella IR característica* del fuego es la producida por la emisión IR del CO₂, bastarían dos bandas de trabajo (una en la región de emisión del CO₂ y otra en una región de referencia) para distinguirlo de otras fuentes de emisión, que pudiesen provocar falsas alarmas [de Castro 98] [de Castro 00]. La situación es similar a la que se plantea en el estudio de la cubierta vegetal en teledetección, donde el contraste espectral entre la reflectancia de la vegetación en el rojo (entre 0.58 y 0.68 µm) y el IR cercano (entre 0.72 y 1.10 µm) sirve para definir un *índice de vegetación*, cuyas imágenes proporcionan mucha más información sobre el estado de la cubierta vegetal que las de cualquiera de los dos canales por separado [Sabins 96] [Chuvieco 96].

Para confirmar esta idea, será necesario realizar un simple análisis espectral comparando la radiancia en la región donde no emite el CO₂, con la radiancia en la banda de emisión de dicho gas. Con este fin se definió un *índice de fuego* en [de Castro 00], verificado con medidas espectrorradiométricas y mediante simulación.

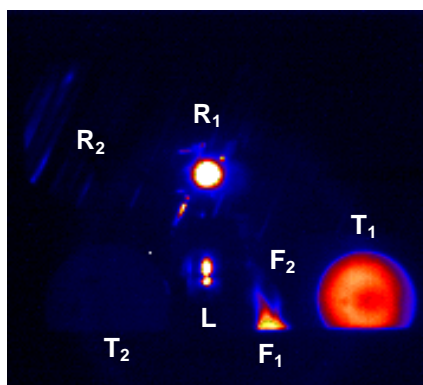
La detección y localización de fuego, sin embargo, exige la utilización de sistemas de imagen. Será en éstos donde un índice de este tipo manifieste su potencia, detectando fuegos incipientes y reduciendo drásticamente la probabilidad de falsas alarmas. Para obtener “imágenes de índice de fuego” será necesario, en primer lugar, disponer de un sistema de imagen en el infrarrojo medio, que nos permita obtener imágenes en las bandas o canales adecuados. Utilizaremos la cámara IR Amber Radiance 1t (apartado 3.2.1) y para dotarla de la resolución espectral necesaria, utilizaremos un filtro interferencial paso alto en 4.25 µm. Por lo tanto, los canales utilizados serán: *canal 1* de 4.25 a 5 µm para la emisión del *spike* rojo de CO₂; y *canal 2* de 3 a 4.25 µm como referencia. A partir de esas imágenes iniciales proponemos definir una “imagen de índice de fuego” en la que se resalte el contraste de las zonas con llama frente al resto de zonas, aunque la radiancia de éstas últimas sea mayor por provenir de fuentes sólidas o a alta temperatura (reflejos solares, etc). La expresión para el *índice de fuego en el infrarrojo medio*, *MFI* (*Medium infrared Fire Index*) será:

$$MFI = \frac{L_1 - 0.36 \cdot L_2}{L_1 + 0.36 \cdot L_2} \quad [5.1]$$

donde L_1 , es la radiancia en unidades arbitrarias para el *canal 1* y L_2 para el *canal 2*, y el factor 0.36 es el de normalización del ancho banda (calculado en cm^{-1}). En virtud de la fuerte emisión de CO_2 en el *canal 1*, este índice tomará valores altos para el fuego, mientras que cuerpos negros o grises tendrán una emisión similar en ambos canales y darán valores bajos.

Para la validación de este índice se procedió a la generación en laboratorio de un escenario IR real, con la presencia de diferentes fuentes para simular falsas alarmas junto a una llama procedente de un quemador de propano, situadas a una distancia de la cámara IR de unos 5 metros. La radiancia de las fuentes utilizadas fue elegida de forma que se cubriese el rango dinámico de la cámara en su totalidad. Estas fuentes, como se puede apreciar en la figura 5.2, donde se muestra una imagen en falso color del escenario en la banda MIR, presentan radiancias superiores, iguales o incluso menores que la llama del quemador de propano. La figura 5.2 es lo que mostraría una cámara IR estándar en la banda de 3 a 5 μm .

En la figura 5.3 se puede comprobar la radiancia integrada para toda la banda MIR (en unidades arbitrarias), mediante los perfiles horizontales que se han extraído de la imagen a diferentes alturas, con el fin de mostrar la zona más intensa de cada fuente y la radiancia de la llama a diferentes alturas. En la gráfica se representa la radiancia integrada para toda la banda de 3 a 5 μm para cada uno de los píxeles de los perfiles seleccionados. Se pueden apreciar las grandes diferencias de señal de algunas de las fuentes como el reflejo solar especular o la lámpara halógena frente a la llama, sobre todo respecto a las zonas de llama fría en la parte superior de la misma. A la vista de los perfiles extraídos es patente que la aplicación de una umbralización en una cámara MIR estándar daría falsas alarmas. Aplicando el índice de fuego en el infrarrojo medio, MFI (definido en [5.1]), a dicha imagen, podemos comprobar claramente que las falsas alarmas desaparecen y queda resaltada la llama en su totalidad, incluso en la zona superior de llama fría donde la temperatura y concentración del CO_2 es menor (figura 5.4 derecha). En la parte superior de dicha figura se muestra el nivel de señal para el píxel más energético de las diferentes fuentes utilizadas en el escenario (nomenclatura utilizada en figura 5.2).



- F₁.- Llama de alta intensidad (parte inferior)
- F₂.- Llama de baja intensidad (parte superior)
- T₁.- Cuerpo a 575 K
- T₂.- Cuerpo a 325 K
- R₁.- Reflejo solar especular
- R₂.- Reflejos solares difusos
- L.- Lámpara halógena a 3000 K

Figura 5.2. – Imagen en la banda MIR de 3 – 5 μm donde se muestra la radiancia integrada en esta banda (en unidades arbitrarias) del escenario IR generado para la validación mediante imagen del MFI. A la derecha se detallan las diferentes fuentes utilizadas (adaptado de [Aranda 99]).

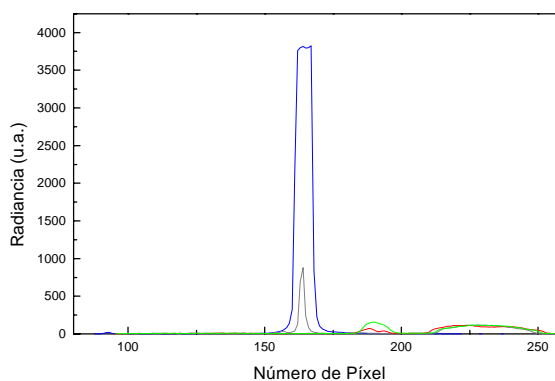
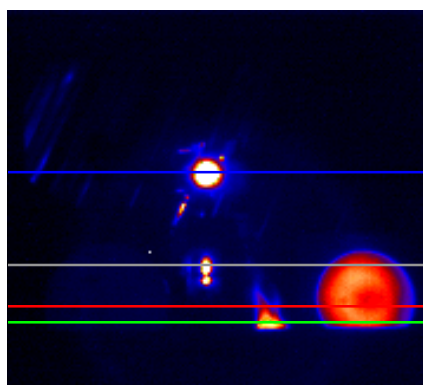


Figura 5.3. –Imagen de las diferentes fuentes del escenario IR en radiancia normalizada en unidades arbitrarias para la imagen de la figura 5.2. A la derecha se muestra una gráfica de la radiancia de los diferentes perfiles señalados en la imagen donde se puede apreciar que la radiancia para algunas de las falsas alarmas es muy superior a la del fuego.

Aplicando el MFI a la señal de estos píxeles obtenemos una clara separación entre aquellos que pertenecen a la llama y aquellos que no (posibles falsas alarmas) (figura 5.4 superior derecha). No obstante, la potencia para la discriminación de falsas alarmas y localización del fuego de este índice se aprecia en mayor medida al procesar con dicho algoritmo la imagen del escenario IR completo, donde la separación del fuego es muy llamativa (figura 5.4 parte inferior derecha). Es necesario, sin embargo, explicar la aparición en dicha imagen de una serie de píxeles brillantes en la zona del reflejo especular y de la lámpara halógena. Estos píxeles que pueden parecer inicialmente errores del algoritmo que produce falsas alarmas aleatorias, sin embargo, dan idea de su potencia cuando se aplica a sistemas con resolución espacial, ya que corresponden a reflejos de llama en zonas metálicas del soporte utilizado y en el foco de la lámpara

(ambos de alta reflectancia en el IR). Por otro lado, se puede observar la perfecta definición de la llama en la imagen procesada con el algoritmo MFI, incluso mayor que en la imagen MIR.

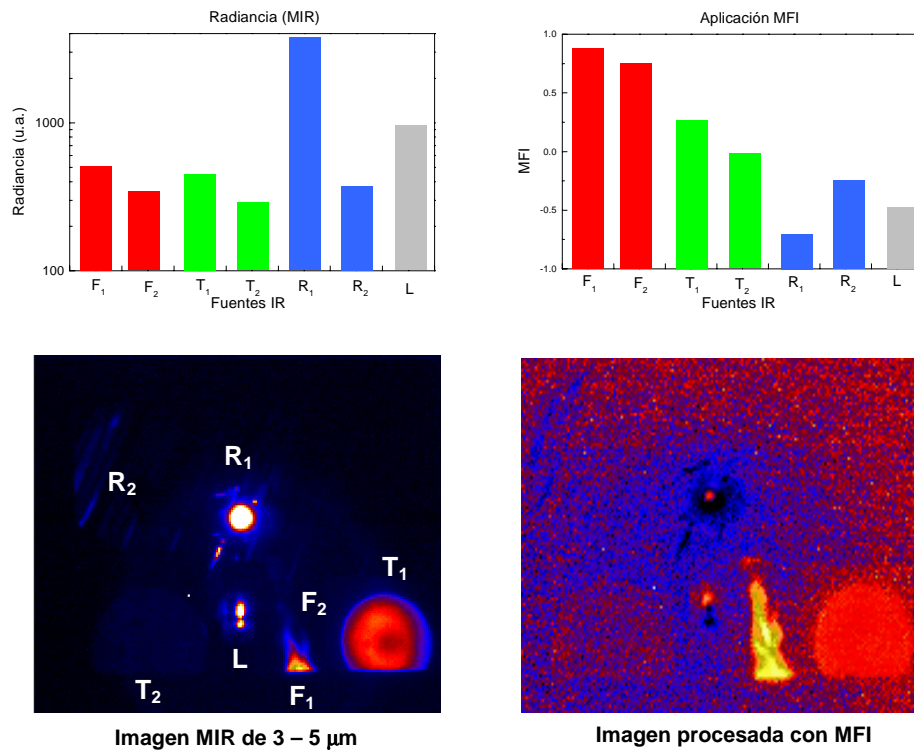


Figura 5.4. – Resultados de la aplicación del MFI (inferior derecha) al escenario IR generado (inferior izquierda). En la parte superior se pueden observar los valores radiométricos para el píxel más energético de cada fuente (nomenclatura utilizada en figura 5.2) y para dos zonas de la llama (intensa F₁ y débil F₂) obtenidos para la imagen del escenario generado tomada de 3 a 5 μm (izquierda), sobre los que se ha aplicado el MFI (derecha).

En conclusión, se ha verificado la utilidad del MFI para la identificación y localización del fuego mediante imagen IR, en un escenario donde predominaban las falsas alarmas (figura 5.2). Este sencillo procesado espectral se ha practicado a las imágenes obtenidas mediante una cámara MIR estándar, a la que se ha dotado de cierta resolución espectral, utilizando un filtro paso alto en 4.25 μm , comprobándose experimentalmente que resulta mucho más efectivo situar un umbral de detección del fuego sobre las imágenes proporcionadas por el algoritmo MFI, que sobre las imágenes MIR.

5.3. Índice de fuego interbanda: MIR y TIR

Hemos visto como la utilización de información espectral optimiza la detección en el infrarrojo mediante imagen IR, permitiendo identificar y localizar espacialmente fenómenos con una clara *firma espectral*, como es el fuego, frente a otras fuentes emisoras que pueden darse en un escenario IR real. En esta primera aproximación, para la optimización de los procesos de detección mediante imagen IR, se han utilizado imágenes en el infrarrojo medio, en la región espectral de emisión del CO₂ y en la región donde éste no emite, tomadas muy próximas en el tiempo pero no simultáneamente (< 100 ms).

Esta falta de simultaneidad producía algunos efectos parásitos, que, aunque no perceptibles en la figura 5.4, pueden ser importantes cuando la variación espacio-temporal es grande. En concreto, en llamas poco estables podemos tener valores de índice de fuego anómalos. Por tanto, sería recomendable para aplicar un índice de fuego eficazmente que las imágenes fueran simultáneas. Ese requisito de simultaneidad ya fue planteado en el espectrómetro biespectral de imagen IR desarrollado en este trabajo, que proporciona imágenes simultáneas en el infrarrojo medio y térmico (capítulo 3). Resulta por tanto atractiva la idea de establecer un *índice de fuego interbanda*, es decir, basado en la comparación de las bandas MIR y TIR, y que llamaremos simplemente *FI* (*Fire Index*). Este índice fue propuesto originalmente a partir de medidas espectrorradiométricas de quemas reales en [de Castro 98]. En dicho trabajo se estudia la emisión de quemas de diferentes combustibles y se define un índice de fuego FI, que relaciona la radiancia detectada en una región espectral dentro de la banda MIR, muy sensible a las altas temperaturas y que por supuesto comprende la banda de emisión del CO₂, con la emitida en una región espectral sensible a emisiones a temperatura ambiente y localizada dentro de la banda TIR. La expresión de dicho índice de fuego es la siguiente [Briz 02]:

$$FI = \frac{L_H - L_L}{L_H + L_L} \quad [5.2]$$

donde L_H , representa la radiancia detectada entre 4.15 – 5 μm (2410 – 2000 cm^{-1}) y L_L la radiancia detectada entre 9.09 – 12.5 μm (1100 – 800 cm^{-1}). Estas bandas fueron elegidas para poder realizar la mejor identificación del fuego. Es de esperar a partir de esta definición que, en primera aproximación, los valores positivos del FI correspondan a fuegos mientras que los negativos correspondan a falsas alarmas. Para aplicar este

índice de fuego con cámaras IR, será necesario modificarlo ligeramente, debido a que la anchura de los canales será algo mayor ya que se utilizará la anchura espectral de las cámaras [Aranda 01a]. Por tanto el canal MIR irá de 3 a 5 μm ($3333 - 2000 \text{ cm}^{-1}$) y el TIR de 8 a 12 μm ($1250 - 833 \text{ cm}^{-1}$). La expresión que utilizaremos para el índice de fuego será:

$$\text{FI} = \frac{L_{\text{MIR}} - L_{\text{TIR}}}{L_{\text{MIR}} + L_{\text{TIR}}} \quad [5.3]$$

Al evaluar la expresión anterior, se puede observar que cuando exista fuego la radiancia emitida en la región MIR será mucho más elevada debido a la emisión del CO_2 ; el numerador tendrá un valor positivo, y el FI será mayor que cero. Por el contrario, en ausencia de fuego, para las temperaturas que se suelen encontrar en un escenario IR, la radiancia es mayor en la región TIR, por lo que el numerador tendrá un valor negativo y en consecuencia el FI.

Para verificar el índice de fuego interbanda, FI, es necesario adquirir imágenes simultáneas y co-registradas de dos cámaras, una MIR y otra TIR, calibradas en radiancias y con la atenuación adecuada para evitar la saturación. Se trata de un sistema un sistema de adquisición de imágenes IR mucho más exigente y complejo que el requerido para el MFI, pero precisamente éstas son las prestaciones que reúne el espectrómetro de imagen desarrollado en este trabajo y descrito en el capítulo 3. Dicho sistema proporciona imágenes simultáneas (en el peor de los casos con un desfase de 10 ms, debido a la diferencia de la frecuencia de reloj utilizada en cada cámara), susceptibles de co-registración debido al alineamiento óptico de ambas cámaras y en las que se han evitado los problemas de saturación utilizando la atenuación adecuada en cada caso. El preprocesado realizado para la co-registración y calibración en radiancias de las imágenes se ha descrito con detenimiento en el capítulo 4.

Por otra parte, la validación de este índice de fuego en las bandas MIR y TIR tiene un interés especial, porque estas son las bandas que se utilizarán en los sensores de los satélites específicos que se han lanzado (BIRD) o están previsto lanzarse (FUEGO, FOCUS, FOS).

Para aplicar el procedimiento y estudiar sus efectos se ha utilizado una metodología que parte del análisis a corta distancia para luego estudiar situaciones más realistas a distancias cada vez mayores.

Llama de laboratorio a corta distancia

La aplicación del índice de fuego FI a corta distancia se realizó en laboratorio utilizando la llama de un quemador de propano de simetría cilíndrica. La línea de visión de las cámaras era horizontal (ángulo cenital de 90°) y la distancia de las cámaras a la llama de 2 m. Para adecuar el rango de medida de las cámaras y evitar la saturación es necesario atenuar la radiación. En la cámara MIR se colocó el filtro neutro denominado ND2, cuya transmisión es del 1 % y también se seleccionó el tiempo de integración más corto de los posibles (igual a 0.157 ms). Para la cámara TIR se utilizó un diafragma de 20 mm de diámetro.

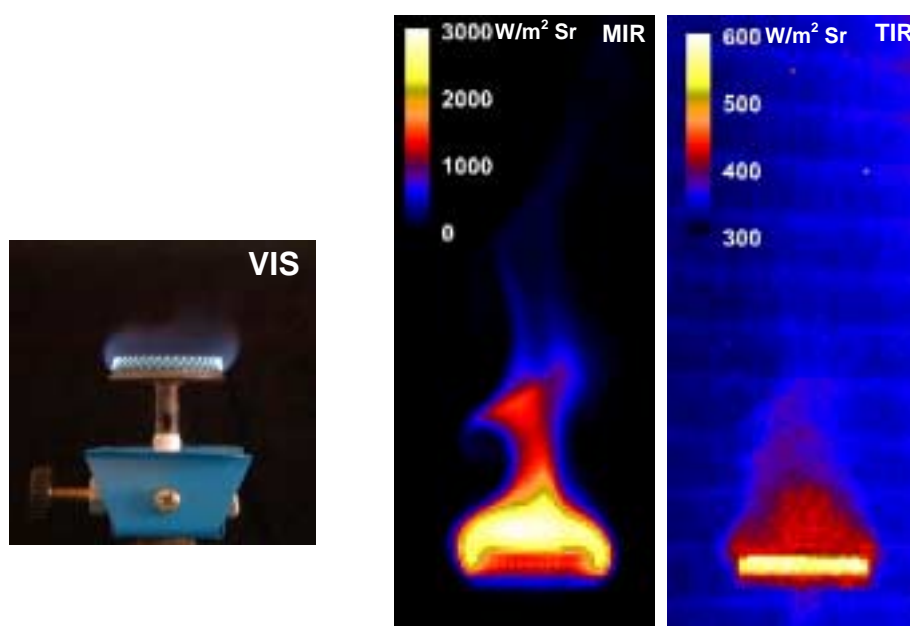


Figura 5.7. – Imágenes de un quemador de propano en visible, infrarrojo medio y térmico (éstas últimas simultáneas, co-registradas y calibradas en radiancia) obtenidas con el espectrómetro de imagen en el IR.

La figura 5.7 muestra la imagen visible (VIS) del quemador utilizado y las imágenes MIR y TIR simultáneas, co-registradas y calibradas en radiancia. A las imágenes IR se les ha aplicado una paleta de falso color, para resaltar aún más la diferente información que se obtiene de cada banda y poder comparar ambas visualmente con la imagen en color obtenida en el visible (es necesario indicar que debido a que la configuración de las cámaras es para medidas de alta temperatura la radiancia obtenida para el fondo es anormalmente elevada).

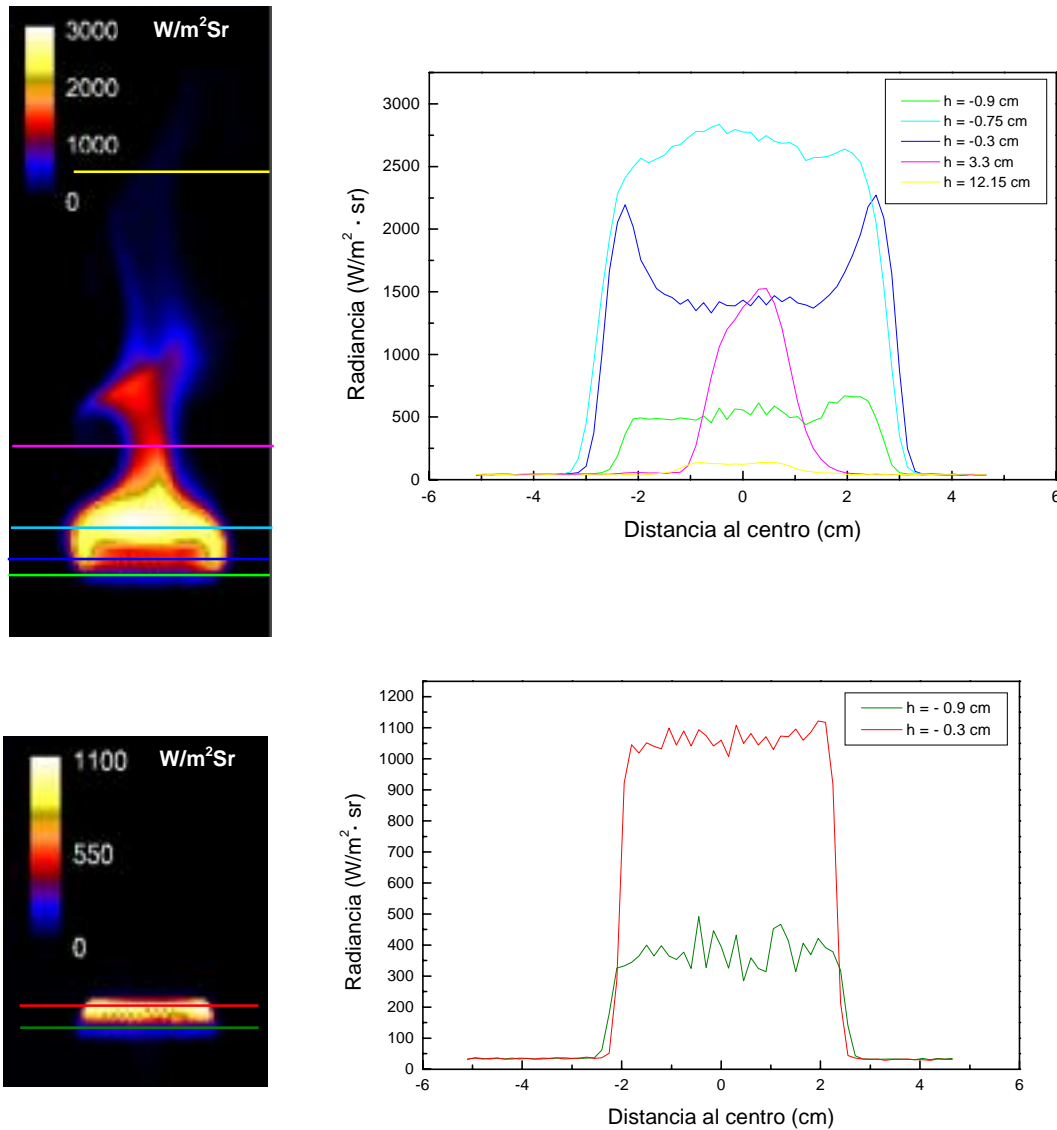


Figura 5.8. – Imágenes MIR calibradas en radiancia de la llama y del quemador recién apagado. A la derecha de cada imagen se muestran los perfiles horizontales de radiancia a las alturas señaladas. Obsérvese como la línea roja correspondiente al quemador apagado es más intensa que otras correspondientes a llamas (el origen de coordenadas se ha establecido en el centro de la parte superior del quemador).

Como se señaló en el capítulo 1, dada la buena definición de la llama en la banda MIR, podría pensarse en principio que toda la información necesaria para la detección del fuego podría obtenerse sólo con esta banda. Sin embargo, si estudiamos las imágenes obtenidas en la banda MIR, figura 5.8, para la llama anterior y para el quemador recién apagado, se puede apreciar que cuerpos a temperaturas elevadas, como el quemador caliente, emiten una radiancia igual o superior a muchas zonas de la llama, y darían por tanto lugar a falsas alarmas.

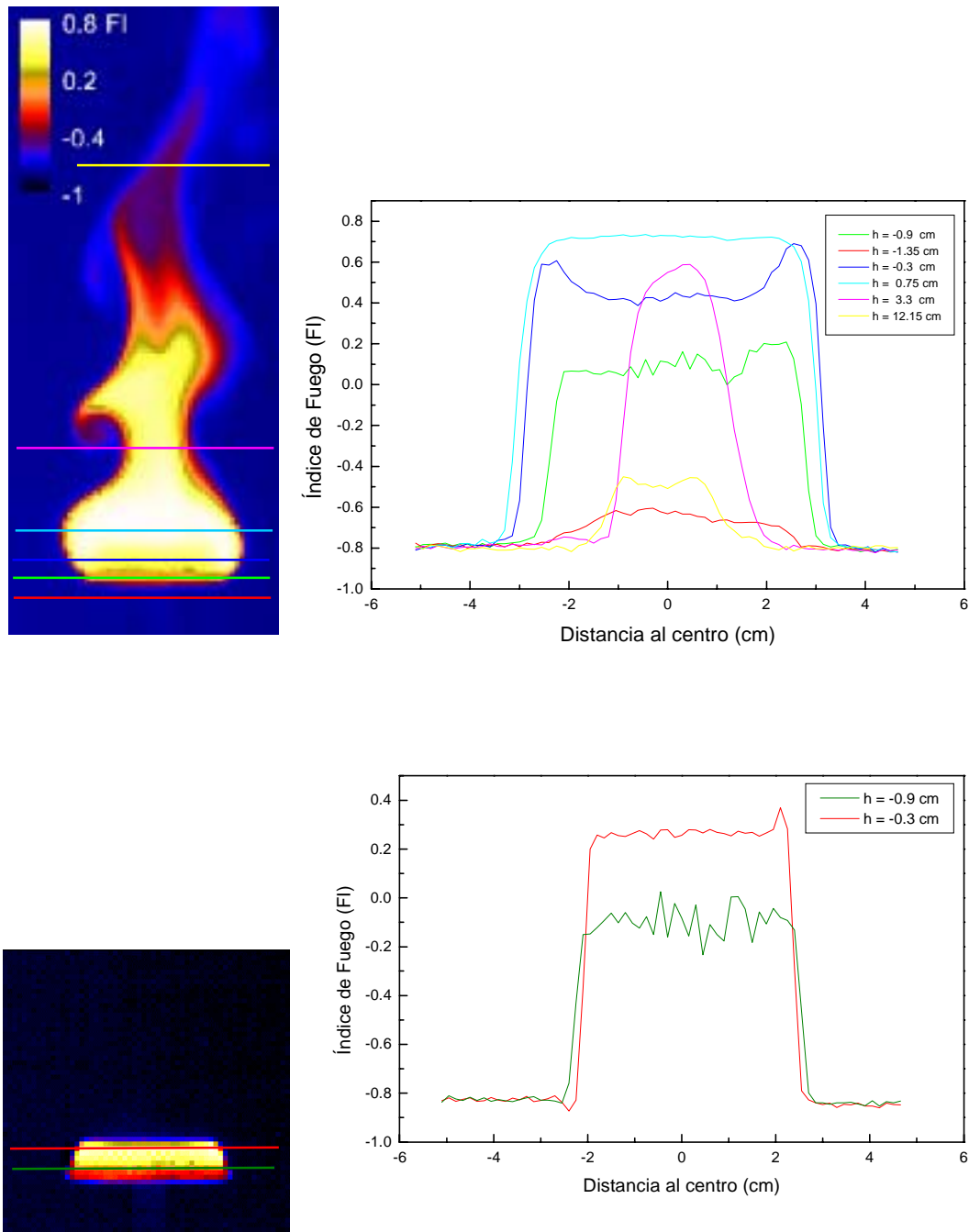


Figura 5.9. – Imágenes de Índice de fuego (FI) obtenidas para una llama de laboratorio a corta distancia y para el quemador recién apagado, a partir de las imágenes MIR y TIR simultáneas, co-registradas y calibradas en radiancia utilizando la expresión [5.3]. A la derecha, gráficas con los perfiles FI obtenidos para las alturas de estudio.

Aplicando el FI a las imágenes simultáneas, co-registradas y calibradas en radiancia, podemos ver (figura 5.9) que el fuego se distingue claramente respecto de las zonas donde no existe llama, incluso de las zonas calientes de la parte inferior del quemador. También se puede observar que la llama queda mucho mejor definida que en

cualquiera de las imágenes en las bandas MIR o TIR. En los perfiles para diferentes alturas de la gráfica de la figura 5.9, podemos comprobar que se detectan claramente las zonas de llama intensa donde el valor de FI es mucho mayor que cero. Pero incluso en las zonas de llama más fría (parte superior), donde el índice toma un valor negativo, este valor sigue siendo superior al de las zonas de fondo de la imagen e incluso las partes calientes en la zona inferior del quemador donde no hay llama. De manera que mediante el FI sería posible detectar el fuego por umbralización sobre la imagen obtenida, incluso para zonas de llama débil, que corresponderían a fuegos incipientes en un incendio forestal.

Fuego sobre plataforma metálica a distancia media

Una vez verificado el FI mediante imagen IR para una llama de laboratorio a corta distancia, para estudiar el comportamiento de dicho índice en un escenario real se realizaron medidas en una nueva configuración en la que cambiaron numerosos aspectos. La nueva configuración se diseñó para que fuese más parecida a la que se tendría desde una torreta de vigilancia en el campo o desde un sistema aerotransportado, dentro de las limitaciones en cuanto a distancia de las instalaciones de la Universidad. La distancia desde las cámaras al fuego era de unos 30 m y el ángulo cenital de observación ahora pasa a ser de 110°. Se hizo un fuego sobre una plataforma metálica de 0.70 m de diámetro utilizando madera como combustible. La atenuación empleada en este caso para la cámara MIR fue el filtro neutro denominado ND1, cuya transmitancia es del 10 %, y un diafragma de 6 mm de diámetro, proporcionando una transmitancia global similar a la anterior; también se seleccionó el tiempo de integración de 0.157 ms. Para la cámara TIR se utilizó un diafragma de 20 mm.

La figura 5.10, muestra la escena en la banda visible y también las imágenes simultáneas para ambas bandas IR, una vez preprocesadas y calibradas en radiancia (sección 4.2) (las imágenes IR tienen un FOV mucho menor que la visible). Se aprecia que la emisión en la banda MIR es mucho más elevada y la llama queda bien definida. Pero en los perfiles horizontales se observa que la radiancia emitida por la plataforma metálica (perfil rojo) es más elevada que la emitida por las zonas de llama mas fría (figura 5.11).

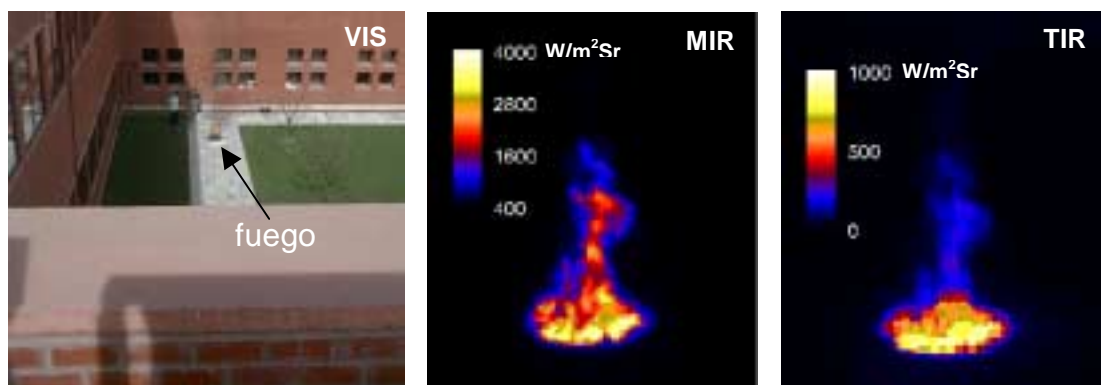


Figura 5.10. – Imágenes VIS, MIR y TIR obtenidas con el espectrómetro de imagen en un escenario fuera de laboratorio para la medida de un fuego a media distancia. Las imágenes simultáneas MIR y TIR han sido preprocesadas (ver sección 4.2) para obtener los mapas de radiancias que se muestran.

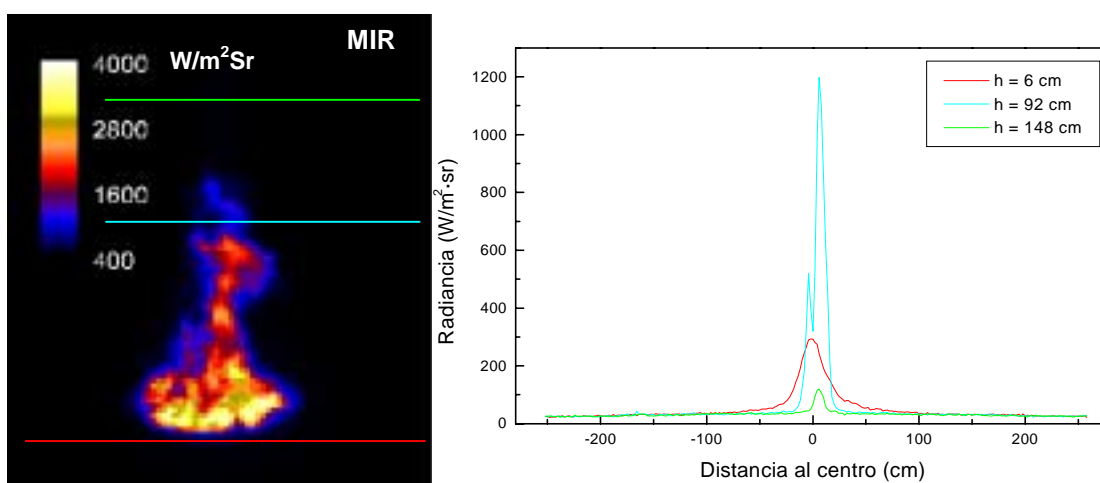


Figura 5.11. – Estudio de perfiles de radiancia para la imagen MIR a diferentes alturas. Se puede apreciar que la radiancia emitida por la plataforma metálica (perfil rojo) es superior a la de algunas zonas de llama débil (perfil verde).

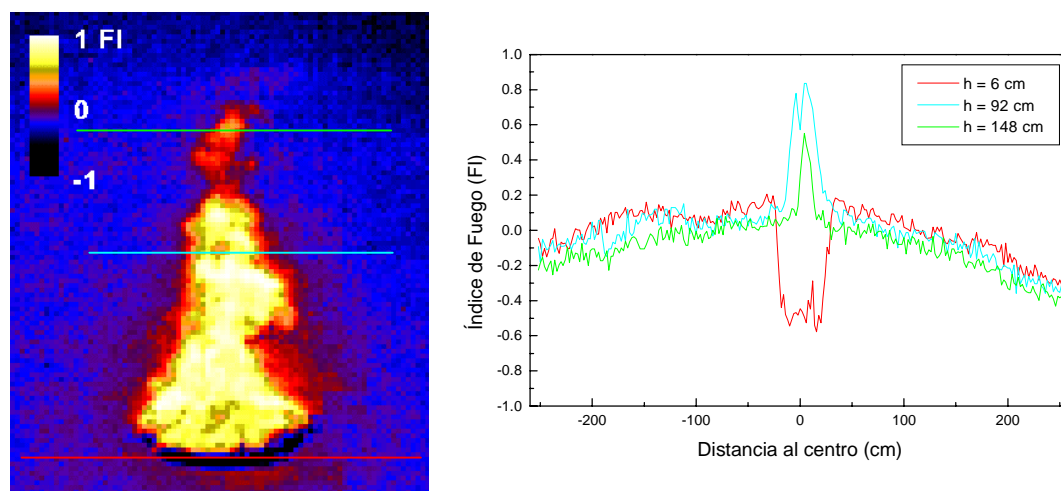


Figura 5.12. – Imagen obtenida al aplicar el algoritmo FI a las imágenes MIR y TIR (figura 5.10) para este fuego a una distancia de 30 m. En ella se puede ver una mejor definición de todo el escenario IR, distinguiéndose incluso zonas de llama débil en la parte superior de la misma y también la plataforma metálica donde se hizo el fuego. A la derecha se muestran los perfiles para las alturas indicadas.

Por tanto la aplicación de un umbral basado en la radiancia detectada en la banda MIR, supondría de nuevo elevar la tasa de falsas alarmas y lo que es más grave no detectar fuegos incipientes, que se corresponderían con la emisión de la zona débil de la llama. Sin embargo, si aplicamos el índice de fuegos FI, figura 5.12, vemos que el contraste es mucho mayor y se distingue claramente la plataforma metálica. También se aprecia nítidamente la parte alta de la llama, de manera que utilizando este algoritmo es posible la detección de fuegos muy débiles.

5.4 Comparación entre índices de fuego

En las secciones anteriores se han hecho dos propuestas de *índices de fuego*, tomando como base el espectro de emisión de fuego incipiente (figura 5.1). En el primer caso, las dos bandas están en el IR medio, en el segundo, las bandas son, prácticamente al completo, las ventanas atmosféricas del infrarrojo medio y térmico.

En ambos casos, las imágenes IR en las dos bandas se combinan en una *imagen de índice de fuego* cuyo contraste está relacionado con la presencia de fuego, en lugar de con la intensidad de radiación. Esto, además de mejorar la visualización de la llama, permite su detección fijando un umbral para el valor del índice de fuego, algo que no era posible en las imágenes MIR o TIR debido a que la emisión de falsas alarmas podía ser mayor que la de la llama.

Aunque ambos índices comparten estas propiedades básicas, su definición basada en bandas espectrales diferentes hace que presenten algunas diferencias importantes. Una de ellas puede explicarse con referencia a la figura 5.13, en la que se muestran los valores de ambos índices para cuerpos negros en un amplio intervalo de temperaturas. Se aprecia que para cuerpos negros a altas temperaturas el índice FI toma valores altos, mientras que el índice MFI tiende a cero o incluso a valores negativos. Esto hace que el índice MFI permita discriminar mejor las falsas alarmas debidas a cuerpos a muy alta temperatura. Considerando, por ejemplo, como fuego los valores de $MFI > 0.6$, ningún cuerpo negro con $T > 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ cumple esta condición. Por otra parte, el propio fondo proporciona valores altos de MFI, por lo que para identificar fuegos, además de un umbral en MFI habría que usar un umbral en los canales 1 ó 2. En contraste, el índice FI discrimina mejor las falsas alarmas debidas a cuerpos a temperatura no muy alta. Fijando un umbral en $FI > 0$ para identificar fuegos, sólo los

cuerpos negros con $T > 300\text{ °C}$ lo superarían. Estos darían falsas alarmas, pero en un escenario real es difícil que se den estas temperaturas salvo, precisamente, en incendios. Una consideración especial merecen los reflejos solares, cuya temperatura aparente puede ser muy elevada, y que por tanto se discriminan mucho mejor con el índice MFI que con el FI.

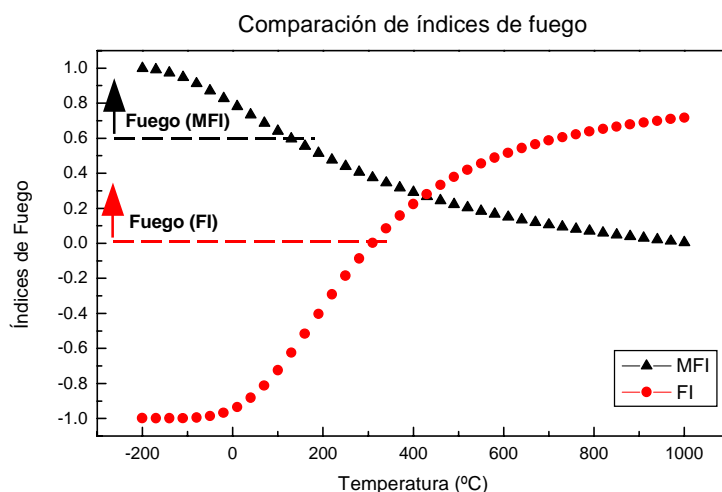


Figura 5.13. – Comparación de los dos índices de fuego propuestos para un amplio rango de temperaturas de cuerpo negro. En la figura se indican, para ambos índices, los valores umbrales por encima de los cuales es más probable la presencia de fuego.

Otra diferencia entre ambos índices concierne a los efectos de la distancia. En [Briz 02] se estudia la variación de ambos índices para fuegos, cuerpos negros calientes y reflejos solares en función de la distancia. Se encuentra que el índice FI disminuye con la distancia más acentuadamente para fuegos y cuerpos negros que para reflejos solares. Esto hace que, aunque la discriminación entre fuegos y cuerpos negros calientes se mantenga a largas distancias, no ocurra lo mismo con los reflejos solares, que pueden dar valores de FI tan altos como las llamas a distancias de sólo 100 m. En cuanto al índice MFI, sus valores también disminuyen con la distancia, pero en este caso se sigue discriminando perfectamente entre fuegos, cuerpos negros calientes y reflejos para todas las distancias estudiadas (hasta 10 km).

Hay que señalar que los índices de fuego, al igual que los de vegetación, son un caso particular del concepto general de *índice espectral* [Verstraete 96]. Si las radiancias incidentes sobre un instrumento multispectral en los canales 1...n son $L_1...L_n$, un índice espectral IE es una cierta función real $IE(L_1...L_n)$. La función se elige generalmente para que proporcione un contraste máximo entre dos clases predefinidas,

que suelen ser una clase objetivo o blanco (*target*) y la clase complementaria. Pueden definirse índices espectrales arbitrariamente sensibles a cualquier fenómeno de interés que posea estructura espectral, y arbitrariamente insensibles a efectos perturbadores específicos [Verstraete 96], pero generalmente ambas cualidades no pueden reunirse en un mismo índice, ya que no puede eludirse el compromiso entre sensibilidad y especificidad (apartado 4.3.1). Para un índice de fuego, los efectos perturbadores serían las falsas alarmas, pero el concepto es general, por lo que podrían ser de gran utilidad índices espectrales específicos en cualquier aplicación relacionada con el análisis mediante imagen de objetos o fenómenos con estructura espectral.

Conclusiones del capítulo

En este capítulo se ha demostrado como la utilización de imágenes IR biespectrales permite superar algunas de las dificultades que plantea la detección de llamas a la termografía IR convencional. Las imágenes IR en las dos bandas se procesan para obtener una imagen de “índice de fuego” cuyo contraste está relacionado con la presencia de fuego, en lugar de con la intensidad de radiación.

La detección de fuegos mediante la fijación de umbrales en índices de fuego (y eventualmente en alguno de los canales utilizados para definirlos) tiene un gran interés práctico, por tratarse de un tipo de procesamiento sencillo que incluso podría implementarse en tiempo real con un sistema de adquisición adecuado.

Para implementar el índice FI podría servir como base el espectrómetro de imagen en el IR (apartado 3.4.2), con el adecuado sistema de procesamiento en tiempo real que permitiera visualizar directamente las imágenes de índice de fuego. Algo similar habría que hacer para visualizar el índice MFI en tiempo real, mediante una sola cámara MIR dotada de un sistema de selección espectral (por ejemplo, mediante una rueda portafiltros).

Al aumentar el contraste de las llamas frente a los fondos u otras fuentes espúreas del escenario, incluso las de alta temperatura, la utilización de imágenes de índice de fuego permite disminuir la probabilidad de falsa alarma. Estas imágenes pueden obtenerse utilizando sistemas de detección IR relativamente simples (basados incluso en una sola cámara IR), que podrían proporcionar detección precoz y automática de incendios forestales.

Lo descrito en este capítulo puede considerarse, en primera aproximación, como un procesamiento para clasificación del escenario IR, de poca definición (fundamentalmente

llama/no llama) pero de gran aplicabilidad práctica en la optimización de los sistemas actuales disponibles en los organismos de extinción. Otros procesos de clasificación más avanzados pero al mismo tiempo más difíciles de implementar, se verán en el siguiente capítulo.

Capítulo 6

Detección y análisis de incendios forestales II. Técnicas de Clasificación

En el capítulo anterior hemos mostrado como las imágenes biespectrales se pueden procesar para optimizar la detección de llamas e incendios forestales mediante el empleo de “imágenes de índices de fuego”. Los índices de fuego son una técnica útil porque permiten sintetizar la información de las dos bandas en una sola imagen, sencilla de interpretar, y de gran utilidad para la detección de fuego. Sin embargo, la síntesis proporcionada por el índice de fuego puede no ser la óptima para todos los escenarios o en todas las situaciones. Por ejemplo, puede ocurrir que interese distinguir no sólo entre fuego/no fuego, sino entre fondo y varias regiones relacionadas con el fuego (rescaldos, suelo caliente, llamas contra un fondo caliente, llamas contra un fondo frío, etc), o, en otras aplicaciones, entre diversas regiones de otro tipo.

Para abordar con toda generalidad el problema de la extracción de información de las imágenes procedentes de un espectrómetro es necesario recurrir a técnicas específicas de procesado, en particular, a técnicas de clasificación (sección 4.3). En este capítulo se trata el estudio y aplicación de estas técnicas a imágenes del espectrómetro construido (capítulo 3), para escenarios de llamas e incendios forestales.

Podemos tomar como punto de partida un caso que fue ya mencionado en la introducción. Las imágenes MIR y TIR que se muestran en la figura 6.1 corresponden a una quema de acícula de pino (*pinus pinea*) en un *túnel de fuego*. Estas quemas se han llevado a cabo en las instalaciones del Centro de Investigación Forestal, del Instituto Nacional de Investigaciones y Tecnología Agraria y Alimentaria (CIFOR-INIA) del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

Como se mencionó en la introducción, las regiones marcadas como TQ (tierra quemada) y LL (llama) no pueden distinguirse sólo a partir del nivel de gris en la banda

MIR debido al importante solapamiento de sus histogramas (figura 6.2, izquierda). Se trata del mismo problema encontrado en el capítulo anterior al estudiar diferentes fuegos (sección 5.3), en los que cuerpos a elevadas temperaturas emitían una radiancia igual o superior al fuego, hecho que provocaba falsas alarmas e impedía detectar el fuego por umbralización sólo con esta banda.

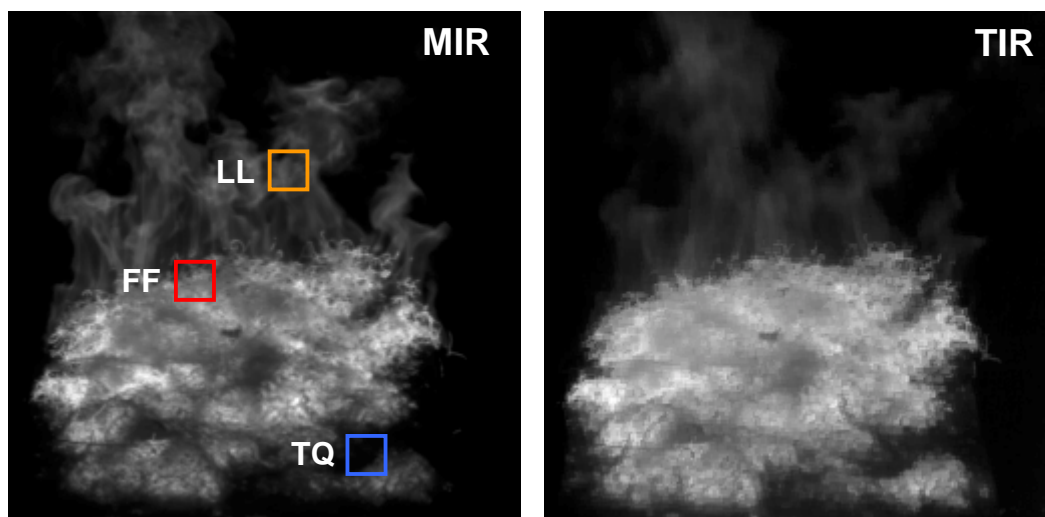


Figura 6.1. – Imágenes simultáneas y co-registradas en las bandas MIR y TIR, de la quema de acícula de pino (*Pinus pinea*) realizada en el túnel del fuego, cuya ignición se realizó delante. En la imagen MIR se señalan las tres regiones de estudio: llama (LL), frente de fuego (FF) y tierra quemada (TQ).

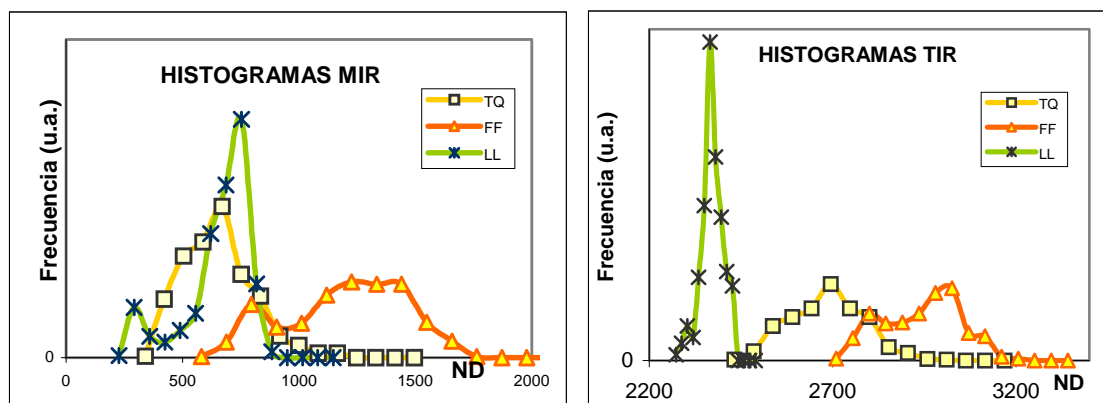


Figura 6.2. – Histogramas MIR y TIR correspondientes a las tres regiones de interés (TQ, FF y LL) seleccionadas en la imagen MIR de la figura 6.1.

Al disponer también de la imagen en la banda TIR (simultánea y co-registrada con la MIR) podemos estudiar su histograma. Encontramos que aquí LL se separa de TQ, pero TQ no se separa de FF (frente de fuego). Es claro que un algoritmo basado en una combinación de umbrales en las dos bandas permitiría distinguir las tres regiones mucho mejor que criterios basados en umbrales individuales en la banda MIR o TIR.

Sin embargo, las imágenes proporcionadas por el espectrómetro de imagen nos permiten hacer mucho más, y mientras estudiemos los histogramas de las bandas por separado no estaremos aprovechando su potencia. En efecto, los histogramas MIR o TIR son conceptos monoespectrales. El concepto natural en una imagen biespectral es el *histograma bivariado*. El histograma bivariado se levanta sobre el dispersograma, donde cada punto representa a un píxel y sus coordenadas (x, y) son los números digitales ND_{TIR} y ND_{MIR} , respectivamente. En el eje z del histograma bivariado se representa la frecuencia o número de píxeles, para un mallado bidimensional determinado en el plano XY . Los histogramas para ND_{MIR} y ND_{TIR} se obtienen a partir de las proyecciones según los ejes x e y , respectivamente.

En el caso que nos ocupa, el dispersograma de las tres regiones de interés de la figura 6.1 se muestra en la figura 6.3. Claramente, los histogramas espectrales MIR y TIR representan las densidades de puntos de las proyecciones según los ejes x e y ; regiones que no son separables en ninguna de estas proyecciones pueden serlo en el dispersograma completo.

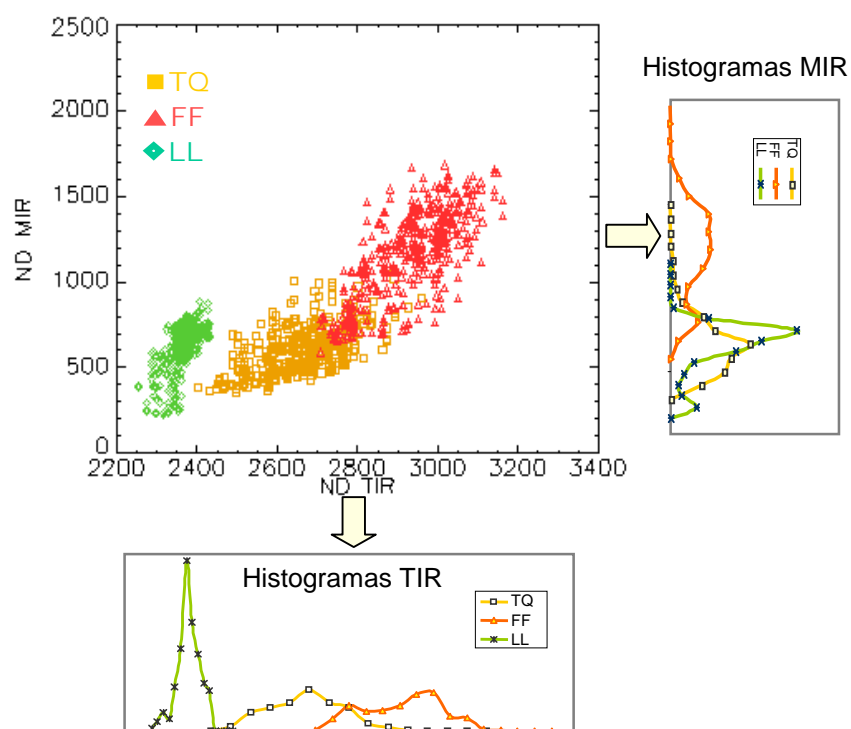


Figura 6.3. – Dispersograma de las regiones de interés seleccionadas en las imágenes de la figura 6.1, con las proyecciones del mismo según el eje x (histograma MIR) e y (histograma TIR).

Se trata, en definitiva, de un problema de clasificación (sección 4.3). Los puntos que aparecen en el dispersograma de la figura 6.3, agrupados en tres clases, son un subconjunto del dispersograma de la imagen completa (figura 6.4, izquierda). En esta

figura 6.4 (derecha) también se muestra el dispersograma de estas mismas imágenes calibradas en temperatura de brillo. Utilizar las temperaturas de brillo permite comparar de una manera más intuitiva la información de ambas imágenes y determinar visualmente las agrupaciones de píxeles o *clusters* que tienen un comportamiento de cuerpo negro o gris, es decir, igual temperatura en ambas bandas (línea discontinua), o se apartan de él como cuerpos selectivos. En estos dispersogramas se ha aplicado una paleta de color a los puntos para indicar su densidad y apreciar mejor sus agrupaciones; esta escala varía desde el rojo, para alta densidad, hasta el violeta para baja.

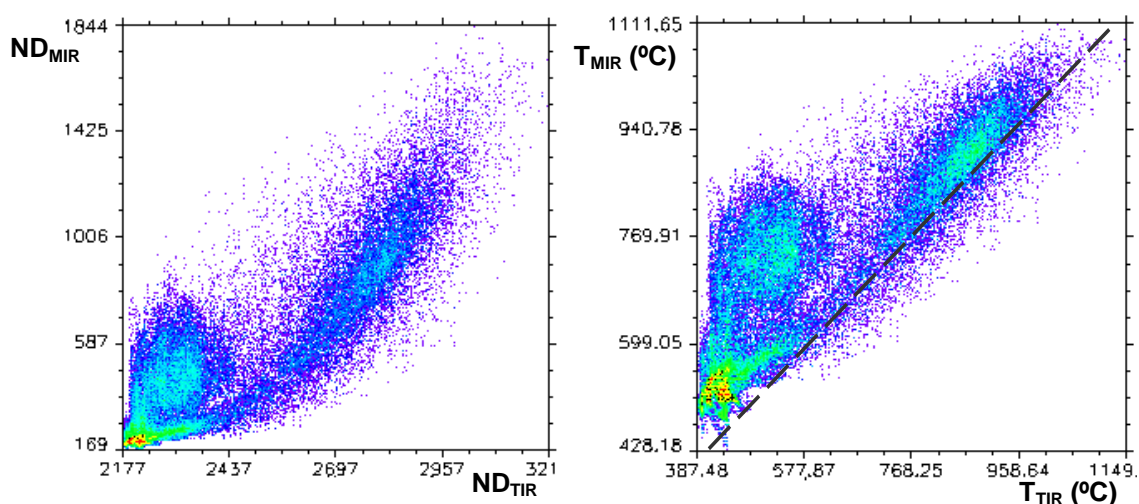


Figura 6.4. – Dispersograma para las imágenes completas de la figura 6.1 en ND (izquierda), y calibradas en temperaturas de brillo. La escala de color aplicada en el dispersograma indica la densidad de puntos en cada zona, alta densidad en rojo y baja en violeta (derecha).

Las técnicas de clasificación descritas en la sección 4.3 permitirán asignar todos esos puntos a alguna de las tres clases, con criterios matemáticos bien definidos.

6.1. Técnicas de clasificación: entrenamiento de las clases

Un paso crítico en el proceso de clasificación es elegir las regiones de entrenamiento del clasificador (ver apartado 4.3.5). Cada una de estas regiones debe ser lo más homogénea posible y representativa de su clase. Esta condición es generalmente difícil de garantizar en imágenes de incendios, como las de la figura 6.1. Para estudiar con más detenimiento el problema conviene empezar por un caso más sencillo en el que la estructura espacial está más definida y permite elegir las regiones de entrenamiento

con más garantías. Volvemos por eso al ejemplo del quemador de propano de simetría cilíndrica estudiado en la sección 5.3. En la figura 6.5 (arriba) se muestran las imágenes de este quemador, ahora calibradas en temperatura de brillo y donde visualmente se puede comprobar la diferente información aportada por cada banda.

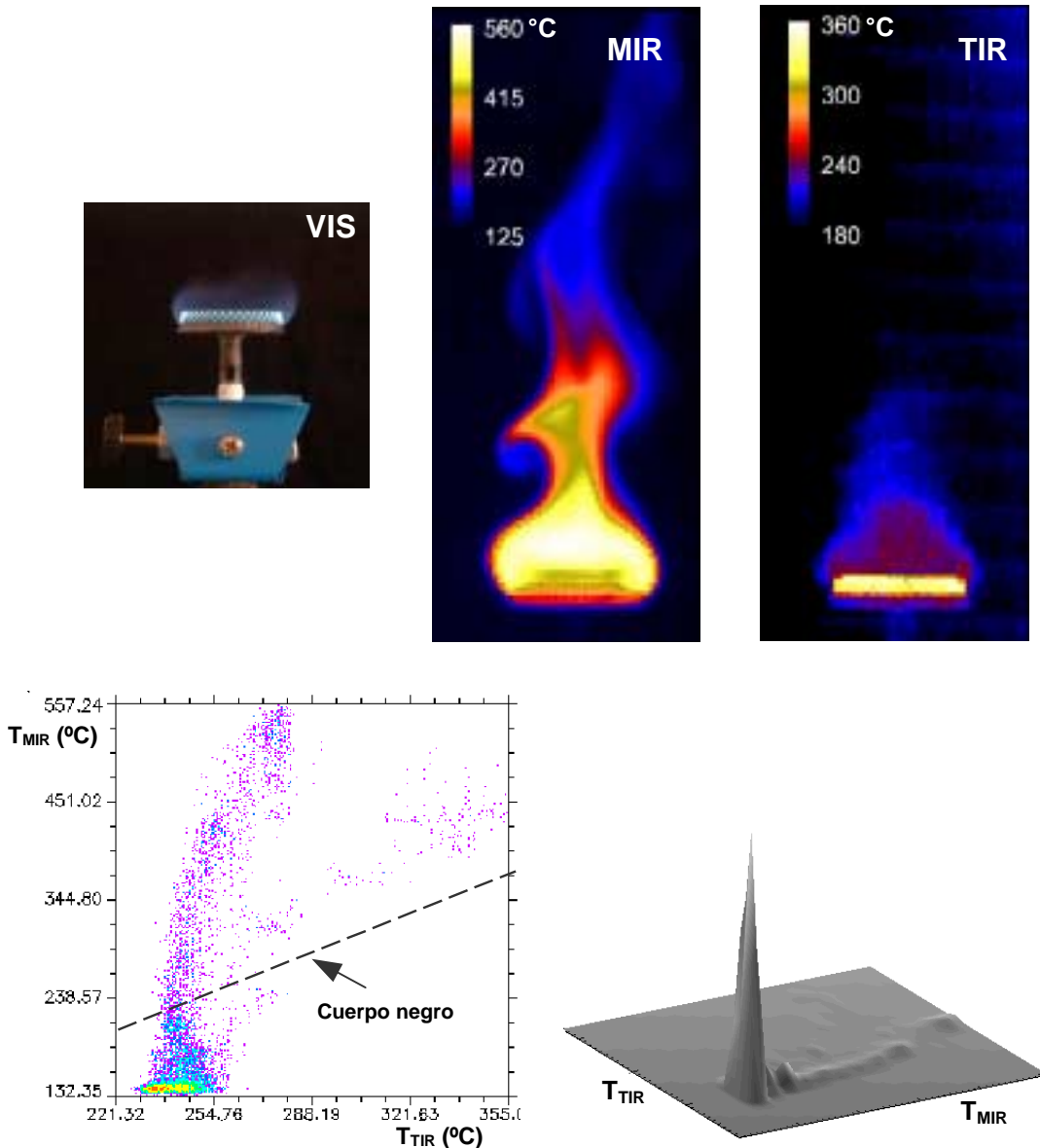


Figura 6.5. – Arriba: Imágenes del quemador de propano (arriba) en visible, infrarrojo medio y térmico (éstas últimas simultáneas, co-registradas y calibradas en temperatura de brillo). Abajo: A la izquierda se muestra el diagrama de dispersión de dichas imágenes, en el que se indica con una línea discontinua el comportamiento de cuerpo negro. Se pueden apreciar dos ramas correspondientes a llama (casi vertical), y llama con cuerpo negro (pendiente cercana a la unidad). La densidad de las agrupaciones de puntos se muestra más claramente en el correspondiente histograma bivariado (derecha).

Analizando el dispersograma (figura 6.5) vemos una clara separación en dos “ramas”: la rama paralela a la línea de cuerpo negro indica la existencia de píxeles cuyo comportamiento se asemeja a un cuerpo negro o gris, que corresponderán al quemador

(el valor algo más alto en temperaturas para la imagen MIR que para la TIR, se debe a la presencia de llama rodeando el quemador). La rama con pendiente más acusada, es decir, donde la temperatura MIR es superior a la TIR, la forman los píxeles correspondientes a la llama. Además, se aprecia en las dos ramas del dispersograma una serie de agrupaciones de píxeles, *clusters*, que corresponden a puntos de la escena con propiedades análogas. Estas agrupaciones se pueden ver también en el histograma bivariado (figura 6.5), que permite apreciar mejor la densidad de puntos. En el eje vertical se representa el número de píxeles con un valor comprendido en un determinado intervalo de temperaturas de brillo en las bandas MIR y TIR.

El análisis de las agrupaciones que forman la estructura del dispersograma nos va a permitir *clasificar* el escenario IR mostrado en las imágenes. Podemos definir nuestras clases de entrenamiento, siguiendo las pautas señaladas en la sección 4.3, de dos formas:

- Sobre las imágenes, definiendo regiones de interés. Esto será posible gracias a que se ha elegido un escenario muy sencillo, del cual conocemos su distribución espacial a priori (lo que en teledetección se llama el *ground truth* de la escena).
- Sobre el dispersograma, a partir de la estructura de los *clusters* que aparecen en la figura 6.5.

En teledetección es más habitual elegir la primera opción, debido en parte a la dificultad de analizar dispersogramas n-dimensionales para imágenes multiespectrales y también porque también es más fácil trasladar la información que se tiene a priori de la escena a través de medidas de campo, fotografía aérea, etc. En nuestro caso, sin embargo, al trabajar sólo con dos bandas, no hay dificultad para visualizar e interpretar la estructura del dispersograma y puede ser conveniente elegir las clases sobre éste. Esta es la estrategia que adoptan los métodos de clasificación no supervisada de manera automática, una vez elegido el número de clases en quiere clasificarse la escena [Campbell 96]. A diferencia de éstos métodos, sin embargo, nosotros no usaremos un algoritmo que identifique *clusters* naturales, sino que identificaremos como clases a regiones donde la densidad de píxeles es más elevada, recurriendo a nuestro conocimiento de la estructura general del dispersograma y su relación con la estructura espacial de la escena. En esta sección utilizaremos ambos métodos de entrenamiento de clases para realizar la clasificación, y poder evaluar cual es el óptimo para lograr nuestro objetivo. En la figura 6.6 se muestra la elección de las clases realizada sobre la

imagen MIR, junto con una tabla donde aparecen su denominación y el color correspondiente. Se han definido tres clases en el quemador (Q1, Q2 y Q3) progresivamente más “frías” y análogamente 5 de llama (L1, L2, L3, L4 y L5), y una de fondo (F). Los píxeles de las clases de entrenamiento se señalan también sobre el dispersograma.

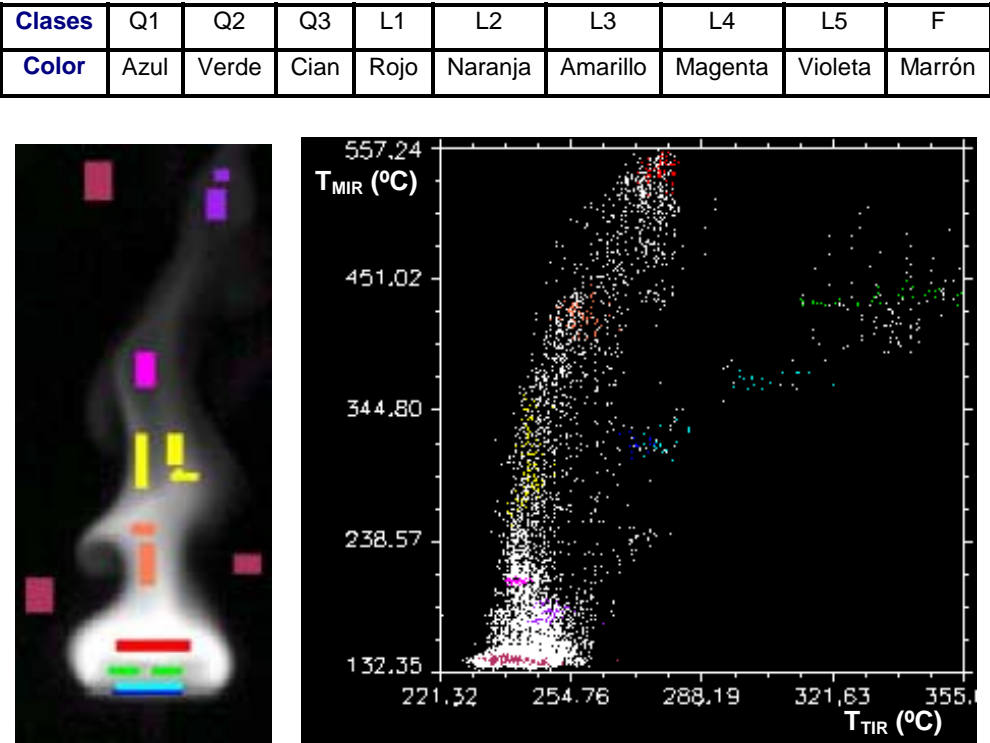


Figura 6.6. – Arriba: tabla con el código de colores utilizado y la denominación de la clase. Abajo: detalle de las clases de entrenamiento elegidas sobre la imagen MIR y su correspondencia sobre el histograma.

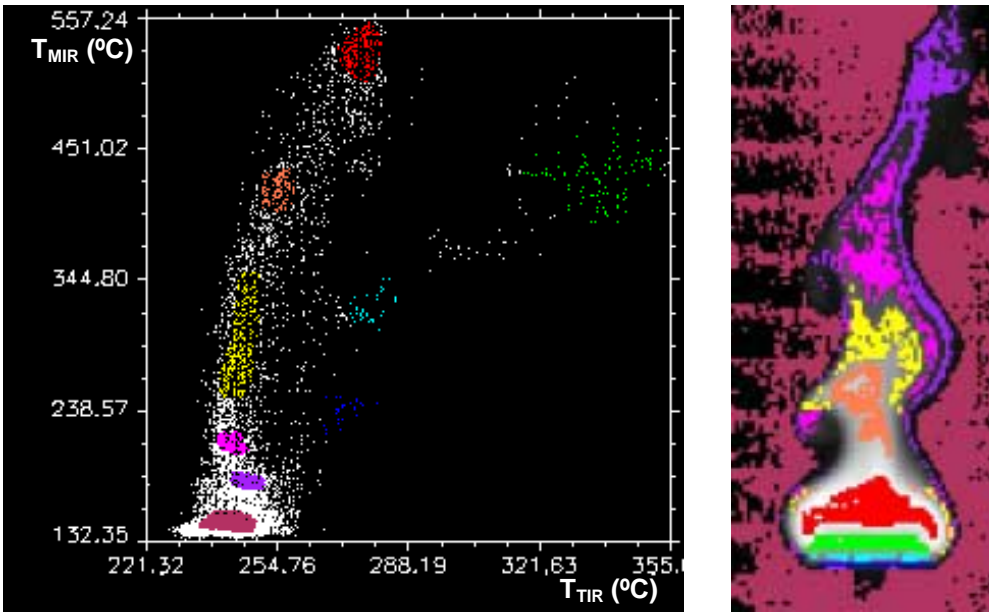


Figura 6.7. – Elección de las clases a partir de los *clusters* del diagrama de dispersión de la figura 6.5 y su correspondencia sobre la imagen MIR (el código de colores es el utilizado en la figura 6.6).

En la figura 6.7 aparecen sobre el dispersograma las regiones elegidas como clases de entrenamiento, que se corresponden con la nomenclatura y el código de colores utilizado para el caso anterior (figura 6.6). En dicha figura también se muestra, sobre la imagen MIR, a qué zonas de la imagen corresponden los píxeles que forman las clases seleccionadas.

6.1.1. Evaluación de la separabilidad de las clases de entrenamiento

¿Cual de los dos métodos de entrenamiento nos proporcionará una clasificación, y por tanto una identificación del fuego mejor? ¿En qué medida suponen una mejora respecto a la clasificación basada en una sola banda MIR o TIR? La comparación no es inmediata porque no tenemos una referencia clara contra la que medir la exactitud de nuestra clasificación. En casos como el de la figura 6.1 no disponemos de datos independientes que nos informen de cual es la distribución de clases. Incluso en el quemador de la figura 6.5, no conocemos el *ground truth* en el mismo sentido en que se puede conocer en teledetección aplicada a la observación terrestre, pues aquí las clases que forman la llama no están separadas por fronteras discretas. Necesitamos por tanto una medida “interna” de la bondad de la clasificación. Esa medida nos la puede proporcionar la divergencia transformada (apartado 4.3.3), que evalúa la separabilidad de las clases. Cuanto mayor sea la separabilidad de las clases de entrenamiento, menor error cometeremos en la clasificación.

Se ha evaluado la divergencia transformada para las clases de entrenamiento definidas sobre la imagen (figura 6.6) cuando se utiliza sólo una banda, MIR o TIR. Los resultados resumidos en la tabla 6.1, muestran que para la imagen TIR el valor máximo de 2 se alcanza para varias parejas de clases, pero la separabilidad es muy pobre entre la llama fría (clases L3 y L4) y el fondo (F), y entre el quemador (Q1) y la llama caliente (L1); también se separan mal las clases contiguas de llama (L2 y L3, L3 y L4). En la imagen MIR la separación es muy buena entre todas las clases excepto entre L2 y Q2 y entre L3 y Q1. Estas clases, sin embargo se separaban bien en la imagen TIR, por lo que es de esperar que utilizar conjuntamente ambas bandas mejore mucho la separabilidad. En efecto, la divergencia transformada calculada para las imágenes biespectrales tiene un valor prácticamente igual a 2 para todas las clases, tanto para las seleccionadas sobre la imagen como para las seleccionadas sobre el dispersograma (en el peor de los casos

se ha obtenido un valor de 1.99858). Este dato nos asegura que el entrenamiento realizado para las clases, tanto con uno como con otro método, ha sido el adecuado y por tanto la clasificación que realicemos con ellas en principio nos debería proporcionar un mapa de clases con pocos errores.

Divergencia transformada imagen TIR								Divergencia transformada imagen MIR							
Clases	Q1	Q2	L1	L2	L3	L4	F	Clases	Q1	Q2	L1	L2	L3	L4	F
Q1	-							Q1	-						
Q2	2.0	-						Q2	2.0	-					
L1	1.00	2.0	-					L1	2.0	2.0	-				
L2	1.93	2.0	2.0	-				L2	2.0	1.07	2.0	-			
L3	2.0	2.0	2.0	1.92	-			L3	1.65	2.0	2.0	2.0	-		
L4	2.0	2.0	2.0	2.0	0.64	-		L4	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	-	
F	2.0	2.0	2.0	1.83	0.70	0.81	-	F	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	-

Tabla 6.1. – Comparación de la separabilidad calculada mediante la divergencia transformada para algunas de las clases de entrenamiento elegidas en la imagen del quemador (figura 6.6) para la imagen TIR (izquierda) y para la imagen MIR (derecha).

Antes de realizar esta clasificación conviene evaluar la separabilidad que podría lograrse con un método alternativo más sencillo: utilizando imágenes de una sola banda pero que contengan información de las dos. Hay dos maneras atractivas de sintetizar la información de las dos bandas MIR y TIR en una sola imagen: formar una imagen de índice de fuego (sección 5.3), o hacer una transformación de componentes principales y quedarse con la primera componente principal.

Divergencia transformada imagen FI								Divergencia transformada imagen CP I							
Clases	Q1	Q2	L1	L2	L3	L4	F	Clases	Q1	Q2	L1	L2	L3	L4	F
Q1	-							Q1	-						
Q2	2.0	-						Q2	2.0	-					
L1	2.0	2.0	-					L1	2.0	2.0	-				
L2	2.0	1.75	2.0	-				L2	2.0	1.45	2.0	-			
L3	1.42	2.0	2.0	2.0	-			L3	1.72	2.0	2.0	2.0	-		
L4	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	-		L4	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	-	
F	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	-	F	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	-

Tabla 6.2. – Comparación de la separabilidad calculada mediante la divergencia transformada para algunas de las clases de entrenamiento elegidas en la imagen del quemador (figura 6.6) para la imagen de índice de fuego, FI, (izquierda) y para la primera componente principal, CP I, (derecha).

En la tabla 6.2 se resumen las divergencias transformadas. Se aprecia que el resultado global es muy similar en ambos casos y supone una mejora respecto de la separabilidad obtenida con la imagen MIR, pero está lejos de alcanzar el valor máximo de 2 para todas las clases que se obtiene con las imágenes biespectrales.

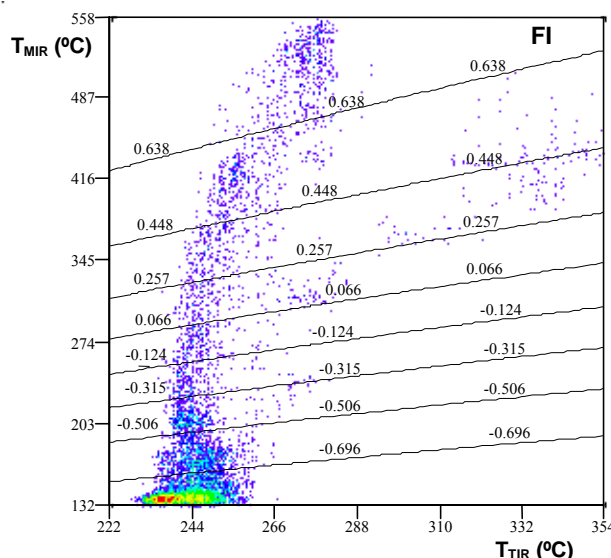


Figura 6.8. – Comparación de los valores de índice de fuego interbanda con el dispersograma del escenario para el quemador de propano de la figura 6.5.

El resultado puede entenderse cualitativamente a partir de la relación entre índice de fuego y dispersograma. Si calculamos el índice para distintas temperaturas de brillo MIR y TIR, es posible dibujar sus isolíneas sobre una gráfica de T_{MIR} frente a T_{TIR} . En la figura 6.8 se han superpuesto estas isolíneas al dispersograma del quemador de propano. Se puede apreciar que, como era de esperar, las regiones de llama corresponden a valores más altos del índice de fuegos. Claramente, utilizar el índice de fuegos supondrá una mejora sobre una clasificación basada sólo en T_{MIR} (cuyas isolíneas son rectas horizontales) o sólo en T_{TIR} (cuyas isolíneas son rectas verticales). Pero es claro también que esa separación sigue siendo bastante menor que cuando recurrimos a la clasificación con clases elegidas sobre el dispersograma. Además, este método es más flexible, y es independiente de posibles errores o derivas del calibrado. Algo similar cabe decir de la clasificación basada en la CP I. En el caso de la figura 6.8, la mayoría de los puntos del dispersograma corresponden a la llama, por lo que el eje CP I sigue aproximadamente la rama de la llama, casi vertical, y la clasificación basada en CP I es similar a la basada en la imagen MIR.

Queda claro, en conclusión, que para clasificar la llama de laboratorio minimizando el error es necesario trabajar con la imagen biespectral; los otros métodos pueden ser interesantes desde el punto de vista de una implementación práctica más simple pero nunca para una clasificación óptima.

6.1.2. Clasificación

Para obtener el *mapa de clases* o *mapa temático*, necesitamos asignar los píxeles que no pertenecen a las clases de entrenamiento a su correspondiente clase. Para ello, como indicamos en la sección 4.3, emplearemos un clasificador que calcula la probabilidad de que estos píxeles pertenezcan a una u otra clase en función de su posición en el dispersograma, asumiendo que las distribuciones de las clases son gaussianas. Este clasificador se denomina de *máxima verosimilitud* y el resultado obtenido para las dos formas de entrenamiento de las clases se muestra en la figura 6.9, a la izquierda para la elección y entrenamiento de clases sobre la imagen y a la derecha para el entrenamiento de clases sobre el dispersograma. En dichas imágenes puede verse que aún quedan píxeles sin clasificar debido a la fuerte restricción impuesta en el algoritmo utilizado, al exigir que clasifique con el 90 % de probabilidad de pertenecer a una u otra clase. En dicha figura se muestra también la imagen MIR calibrada en temperatura de brillo de la figura 6.5, para compararla con la clasificación realizada.

Estudiando los mapas de clases obtenidos, (figura 6.9), podemos observar que la clasificación realizada permite separar el quemador claramente de la llama e incluso nos permite distinguir tres zonas del mismo: la zona superior más caliente compuesta de dos clases, una (Q2) donde se encuentran los orificios por donde sale el gas para generar la llama y otra (Q3) también caliente formada por la parte inferior del quemador donde no hay orificios y que refleja la llama debido al brillo metálico de su superficie; la zona inferior más fría (Q1), es el borde del quemador. Estas tres zonas se pueden apreciar en la imagen visible (figura 6.5). En cuanto a la zona de la llama, puede verse que ha sido clasificada en 5 clases diferentes que se corresponden con zonas de distinta temperatura y concentración de productos de combustión.

En conclusión, se puede decir que la clasificación del escenario es bastante parecida en ambos casos, quedando menos píxeles sin clasificar y una mejor definición del escenario cuando hemos elegido las clases de entrenamiento directamente de los agrupaciones de píxeles que aparecen en el dispersograma.

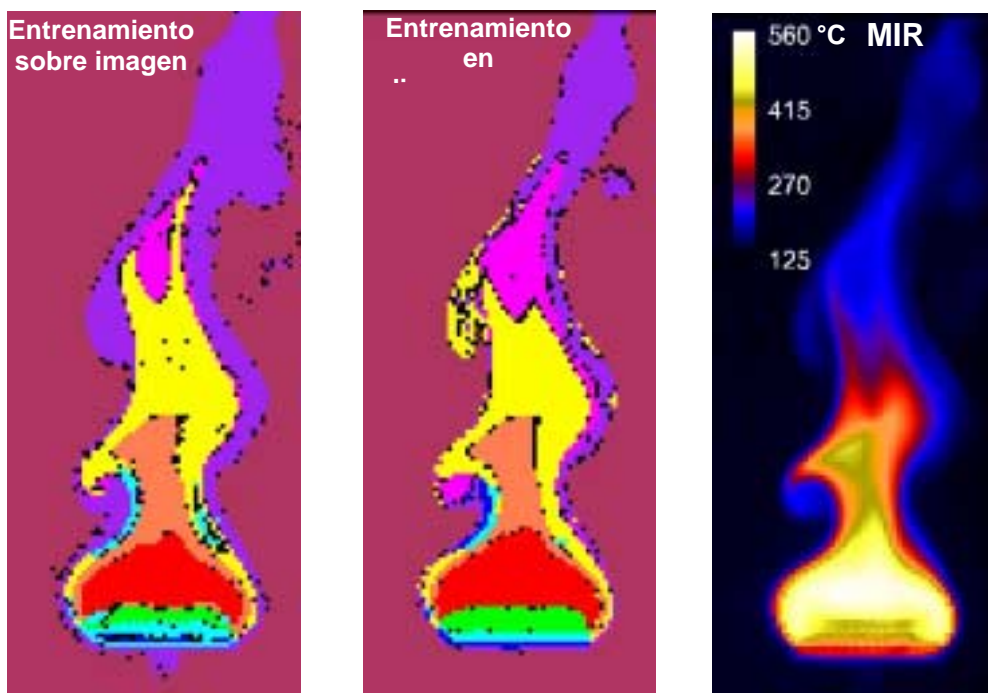


Figura 6.9. – Mapas de clases obtenidos mediante clasificación supervisada por máxima verosimilitud a partir de las clases seleccionadas sobre la imagen (izquierda) y sobre el dispersograma (centro). A la derecha se muestra la imagen MIR de la llama de propano calibrada en temperatura de brillo, a efectos de comparación.

La comprobación de la efectividad de este método es importante para nuestros objetivos, pues su aplicación no requiere información *a priori* sobre la escena, a diferencia de lo que ocurre con el “entrenamiento” con regiones de interés sobre la imagen. Este último procedimiento, habitual en teledetección, no es sin embargo aplicable en nuestro caso pues requiere un conocimiento de la escena que, por definición, esta ausente en los problemas que nos planteamos. El método basado en la elección de clases de entrenamiento sobre el dispersograma nos permite además solucionar uno de los problemas que suele presentarse en la clasificación supervisada (apartado 4.3.5), como es el imperfecto acoplamiento entre las clases informacionales y las espectrales cuando las clases de entrenamiento se eligen sobre la imagen. En las siguientes secciones veremos cómo el entrenamiento de las clases sobre el dispersograma va a permitir realizar una identificación precisa de las diferentes regiones en un incendio en escenarios y condiciones de medida muy distintas.

6.2. Técnicas de clasificación: aplicación a fuego real

Una vez demostrada en laboratorio la eficiencia de la metodología propuesta para la identificación del fuego y clasificación del escenario, vamos a aplicarla fuera del laboratorio. En concreto, estudiaremos un fuego de leña realizado (por seguridad) sobre una plataforma metálica en el exterior de las instalaciones de la Universidad. El diámetro de la plataforma es de 0.7 m y la configuración de medida puede verse en la imagen visible de la figura 6.10 (arriba), siendo la distancia al fuego de unos 30 m y el ángulo cenital de observación de unos 110° . Las imágenes simultáneas adquiridas con el espectrómetro de imagen IR construido se tomaron con la atenuación adecuada para evitar la saturación, y se muestran co-registradas y calibradas en temperatura de brillo en la figura 6.10. Estas imágenes fueron adquiridas utilizando la misma óptica que las del quemador, por lo que dada la distancia a la que está situado el fuego, la superficie cubierta por el píxel es lógicamente mucho mayor.

En la figura 6.10 (centro) se muestran también el diagrama de dispersión correspondiente, sobre el que se señalan las clases de entrenamiento seleccionadas y su correspondencia sobre la imagen MIR. Este dispersograma muestra de nuevo la presencia de dos “ramas” claramente definidas, relacionadas con llama y cuerpo gris, aunque ahora la densidad de las diferentes agrupaciones de puntos (excepto la correspondiente al fondo) es mucho menor debido al pequeño tamaño del fuego respecto del FOV total. También se observa que en la rama de llama se alcanzan ahora temperaturas más bajas que en la rama de cuerpo gris. Esto refleja el efecto de la absorción del CO_2 atmosférico en la banda MIR, que es mucho más importante que en laboratorio dada la mayor distancia al fuego, y también que ahora, la zona más caliente en la base de las llamas, se observa contra el fondo de cuerpo gris del rescoldo.

La elección de clases de entrenamiento se ha realizado en el dispersograma teniendo en cuenta la similitud de su estructura con la del estudiado para el quemador (figura 6.7). Así, a partir de las agrupaciones de puntos que aparecen en cada una de las ramas, se han elegido las diferentes clases que aparecen en él (figura 6.10, centro). Con estas clases y mediante el método de máxima verosimilitud, exigiendo una probabilidad de pertenecer a una clase del 90 % para la asignación de cada uno de los píxeles de la imagen a una de las clases de entrenamiento elegidas, se ha obtenido el mapa de clases (figura 6.10, abajo). En él podemos distinguir, en primer lugar que las tres clases que

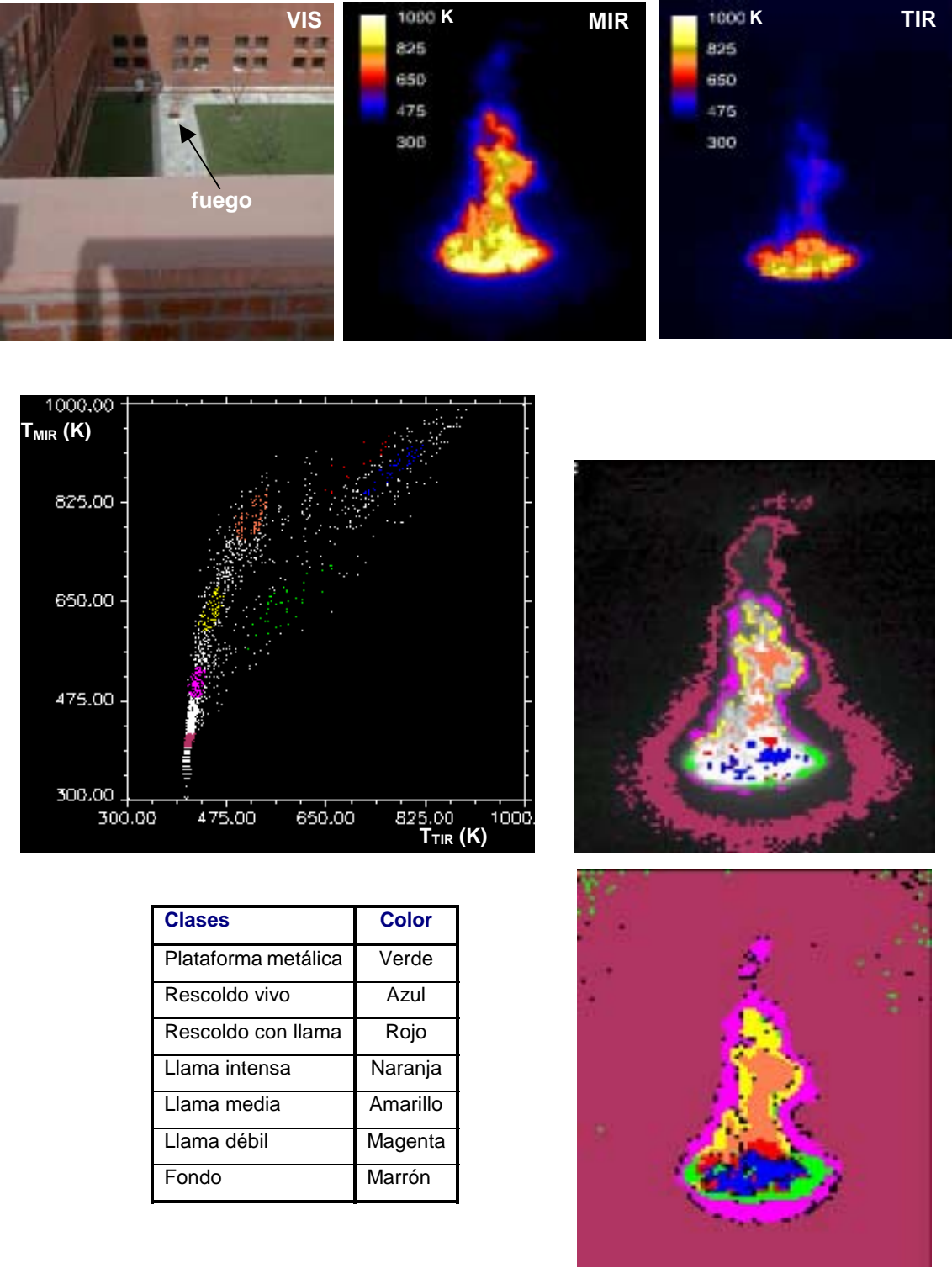


Figura 6.10. – Arriba: imagen en visible (VIS) de la configuración de medida, junto a las MIR y TIR de la quema de leña. Centro: diagrama de dispersión obtenido con ambas bandas, donde se señala la elección de clases de entrenamiento realizada a partir de las agrupaciones de píxeles (izquierda) y su correspondencia sobre la imagen MIR (derecha). Abajo: mapa de clases obtenido mediante clasificación supervisada de máxima verosimilitud. En la tabla se muestra el código de colores utilizado para la clasificación de este escenario.

corresponden a la rama del dispersograma con pendiente próxima a la unidad (rojo, azul y verde), tienen una interpretación natural: la clase de rescoldo con llama (rojo) cuya temperatura es algo superior en la banda MIR por la presencia de llama, queda localizada en la zona frontal y superior de la pila de leña que forma el combustible y correspondería al frente de llama; la clase de rescoldo vivo (azul) de alta temperatura de brillo, similar en ambas bandas, queda en el centro de la pila de leña; mientras que la clase con comportamiento de cuerpo gris, pero con temperaturas de brillo más bajas (verde), corresponde a la zona de la plataforma metálica donde se está realizando la quema y cuya temperatura es alta, debido a la elevada conductividad térmica del metal.

En cuanto a las clases elegidas para la rama de la llama, donde la temperatura de brillo en la banda MIR es mayor, permiten obtener una clasificación de la llama en regiones de diferente temperatura incluso a esta distancia. Además, la clase de llama débil o de baja temperatura (magenta), permite incluso detectar reflejos de la llama en el suelo delante de la plataforma metálica.

La clasificación realizada sobre este escenario confirma que la metodología ensayada con escenarios sencillos y fuegos de laboratorio (quemador) es útil para la clasificación de fuegos reales en el exterior y a una distancia superior. Sin embargo, la distancia de observación para una torre de vigilancia forestal, una plataforma aerotransportada o un satélite sería mucho mayor, desde unos kilómetros hasta cientos de ellos. Por esta razón, en la siguiente sección se realiza un estudio sobre el efecto que la distancia y la pérdida de resolución en las imágenes tiene sobre este método.

No obstante, antes de proceder con este estudio es necesario hacer un comentario referente a la *robustez* del método. Éste se basa en la utilización del diagrama de dispersión como herramienta para el entrenamiento de las clases. Para que el diagrama sea significativo es necesario que se cumplan los requisitos de simultaneidad, calibración radiométrica y co-registración. Dados los tiempos característicos del incendio, el grado de simultaneidad de la imágenes MIR-TIR obtenidas con el espectrómetro es más que suficiente, pero no está claro hasta que punto son críticas la calibración radiométrica y la co-registración. Los errores de calibración cambian el valor de las temperaturas de brillo, pero sólo afectan ligeramente a la estructura del diagrama. Incluso grandes cambios en los parámetros de calibración provocarían simplemente un corrimiento del diagrama pero su estructura y la posición relativa de las agrupaciones de píxeles serían prácticamente las mismas. Esta es una característica muy deseable. En particular, la deriva térmica que afecta a nuestra cámara

TIR (apartado 4.1.1) produce sólo un desplazamiento del dispersograma, sin afectar apenas a las pendientes de los *clusters*.

En contraste con esta relativa insensibilidad al calibrado, un ligero desplazamiento en la co-registración de las imágenes degrada enormemente el diagrama y se pierde la estructura del mismo, sobre todo si los fuegos estudiados son muy pequeños o se estudian desde una gran distancia, es decir, si ocupan pocos píxeles. Por otra parte, en ocasiones puede sacarse partido a esta sensibilidad ya que en casos de co-registración dudosa para un escenario donde hay fuego, es posible mejorarla mediante una ligera traslación utilizando como referencia la estructura del dispersograma.

6.3. Efectos de la distancia: fenómenos subpíxel y atenuación atmosférica

La identificación del fuego y clasificación del escenario tienen su mayor interés para largas distancias, por lo que debemos evaluar la metodología propuesta en la sección anterior para ese caso.

Los efectos que la distancia provoca sobre las imágenes son principalmente dos: la *pérdida de resolución espacial* de las imágenes y la *atenuación atmosférica de la radiación*. Ambos afectan al dispersograma de manera no trivial. Para un foco caliente grande, el aumento del área subtendida por un píxel supone una pérdida de resolución espacial. Sin embargo, si el área del píxel llega a ser mayor que la imagen del foco, aparecen “fenómenos subpíxel” que complican la interpretación de la imagen. Por otra parte, la atenuación de la radiación afectará de una forma selectiva y más acusada, para distancias del orden de kilómetros, a la banda MIR a causa de la absorción del CO₂ atmosférico. Este último efecto puede alterar notablemente la estructura del dispersograma.

6.3.1. Fenómenos subpíxel

Hasta aquí, todos los fuegos que se han estudiado tenían un tamaño superior al del IFOV del sistema. Sin embargo, si la fuente es pequeña y está situada a una gran distancia, puede ocurrir que ocupe sólo una porción del IFOV y por tanto no llene un

píxel completo. El estudio de este caso es obviamente de interés cuando se trata de detectar un fuego incipiente y lejano.

Si el tamaño de la fuente es menor que el IFOV, la señal del correspondiente píxel será la suma de dos contribuciones: la de la propia fuente y la del fondo, y sería erróneo atribuir una temperatura homogénea al píxel. Esta inhomogeneidad, sin embargo, puede en determinadas circunstancias detectarse e incluso estimarse cuantitativamente.

En la figura 6.11 se representa la radiancia espectral emitida por un IFOV en el que el 95% está formado por fondo a 300 K y un 5% es un cuerpo negro a 1000 K. Para tal región, la temperatura aparente en 4 μm es de 550 K, mientras que en 10 μm es tan sólo de 380 K. Por tanto, la inhomogeneidad del píxel da lugar a una diferencia de temperaturas aparentes en las regiones MIR y TIR. Si se conoce la temperatura del fondo y se asume que el IFOV está formado por dos cuerpos negros, a partir de las temperaturas MIR y TIR puede estimarse el área del foco caliente y su temperatura. Esta técnica, propuesta por Dozier en [Dozier 81] ha sido aplicada ampliamente a imágenes obtenidas por los satélites NOAA, con el objetivo de estimar el área y la temperatura de incendios forestales a partir de la discrepancia de valores entre las temperaturas aparentes de los canales 3 (de 3.55 a 3.93 μm) y 4 (de 10.3 a 11.3 μm) del AVHRR [Richards 99].

La figura 6.12 muestra las temperaturas de brillo que medirían nuestras cámaras MIR y TIR (con IFOV de 0.76 mrad y 1 mrad, respectivamente) cuando un cuerpo negro cuadrado de 10 cm de lado se aleja desde una distancia cercana en torno a 10 m, en la que ocupa varios píxeles, hasta una distancia de unos 10 km, en la que ocupa una fracción muy pequeña de un píxel¹. Se han representado las temperaturas de brillo aparentes para dos cuerpos negros a 900 y 700 K, considerando que el resto del píxel se llena con radiación proveniente del fondo a 300 K. Para el cálculo de las temperaturas que aparecen en la figura 6.12 solo se tiene en cuenta la pérdida de resolución espacial de las cámaras en función de la distancia y no los efectos de la transmisión atmosférica. Al aumentar la distancia, la temperatura aparente mantiene su valor mientras el foco no sea subpíxel. A partir de la distancia donde esto ocurre, las temperaturas empiezan a disminuir, tendiendo a la temperatura del fondo para distancias muy largas, y siendo

¹ Los datos usados para el cálculo son: distancia inicial = 10 m (para nuestras cámaras, los tamaños de píxel son: MIR=7.6 mm, TIR=10 mm) y distancia final = 10 km (ahora son: MIR=7.6 m, TIR=10 m).

siempre $T_{MIR} > T_{TIR}$. En esta gráfica se puede apreciar que la disminución de la temperatura en la banda TIR comienza antes (primer tramo horizontal) debido a que el IFOV de ésta cámara es mayor.

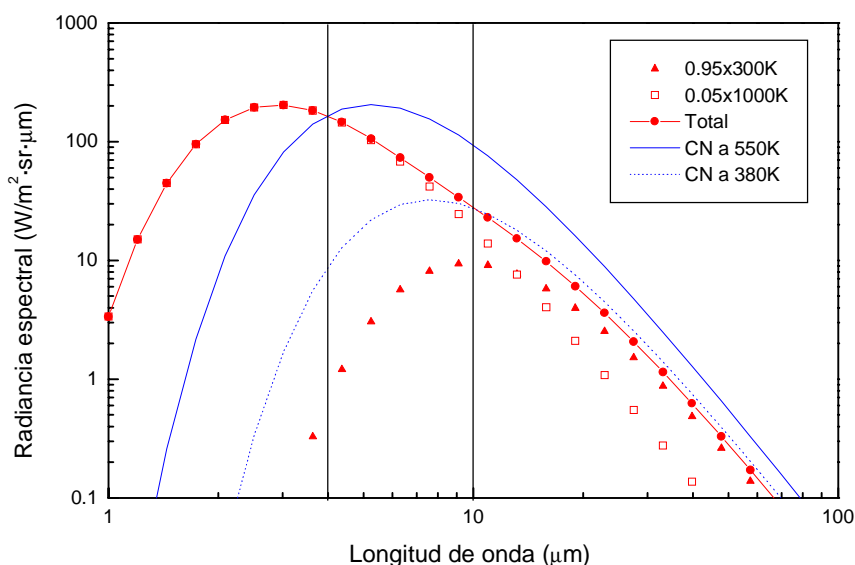


Figura 6.11. – Cálculo de la temperatura que se detectaría en un píxel inhomogéneo que estuviera cubierto en un 95% por un cuerpo negro a 300 K (temperatura de fondo en un escenario típico) y en un 5% por un cuerpo negro a 1000 K. Se representan por separado la radiancia del fondo (triángulos), del foco caliente (cuadrados) y del total (círculos). También se representa la emisión de dos cuerpos negros que cubren el 100% del píxel y que ajustan la radiancia anterior en dos longitudes de onda: 4 μm (CN a 550 K) y 10 μm (CN a 380 K).

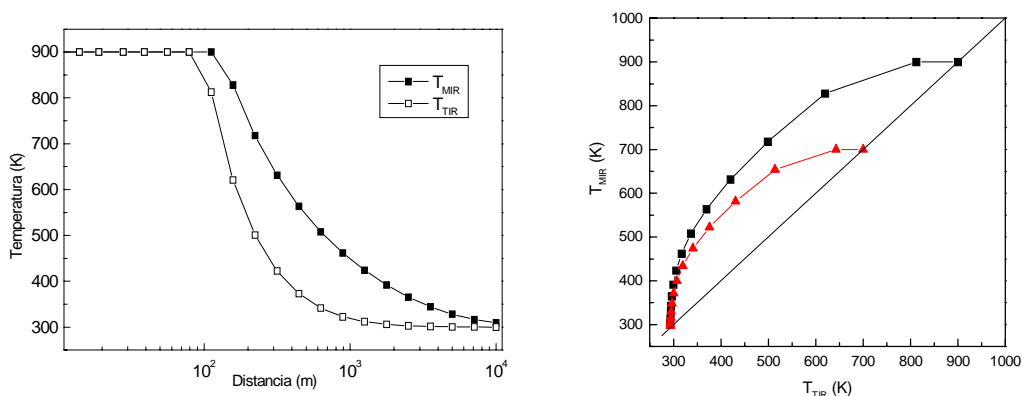


Figura 6.12. – Efectos subpíxel sobre la temperatura MIR y TIR que se mediría con las cámaras utilizadas en el espectrómetro de imagen, para un cuerpo negro cuadrado de lado 10 cm, debidos a la pérdida de resolución espacial provocada por el alejamiento. Izquierda: en función de la distancia, para un cuerpo negro a 900 K. Derecha: temperaturas MIR y TIR para dos cuerpos negros a 700 y 900 K, para las mismas distancias indicadas en la gráfica de la izquierda.

6.3.2. Efectos de la atenuación de la radiación con la distancia

Para evaluar los efectos de la distancia sobre el método de clasificación se va a realizar una simulación degradando adecuadamente las imágenes de una quema tomadas a corta distancia. En primer lugar, se procederá a la clasificación del escenario con las imágenes adquiridas a corta distancia y posteriormente se degradarán radiométrica y espacialmente para una distancia de 1 km, se realizará de nuevo la clasificación y se evaluará su validez. En el siguiente apartado, esta simulación ayudará a interpretar las imágenes obtenidas sobre un incendio real a más de 1 km de distancia.

Conviene destacar que el procedimiento utilizado, descrito aquí para un caso particular, tiene una aplicación general para la simulación de los efectos de la distancia en la imagen de objetos con marcada estructura espectral. El punto clave del método es que la clasificación a corta distancia permite aplicar una transmitancia diferente a cada clase, recogiendo adecuadamente el carácter selectivo de la transmisión atmosférica, y logrando una simulación realista que de otro modo sería imposible.

Clasificación del escenario a corta distancia

Las imágenes originales sobre las que vamos a realizar el estudio se obtuvieron en quemas realizadas en un *túnel del fuego* del CIFOR-INIA. Las quemas fueron realizadas por expertos de este centro y se utilizó como combustible acícula de pino por su interés como precursor del fuego en incendios forestales [Vélez 00b]. La cantidad de acícula de pino empleada y sus condiciones ambientales (humedad, etc) fueron las que habitualmente se encuentran en zonas forestales mediterráneas.

Además de este carácter realista de las quemas, hay otros dos motivos para utilizar estas imágenes en este estudio. En primer lugar, las regiones que se quieren clasificar (llama, frente de llama, rescoldo y combustible sin quemar), ocupan en conjunto prácticamente todo el FOV, de forma que la imagen resultante de la degradación espacial para una distancia de un kilómetro sigue conteniendo un número apreciable de píxeles cubiertos por la quema. En segundo lugar, el ángulo de observación de la quema simula el que se puede tener desde una torreta de vigilancia forestal o desde una plataforma aerotransportada.

El túnel del fuego es una instalación que se encuentra al aire libre y está formada por 8 vagonetas llenas de arena para simular el suelo, sobre las cuales se deposita el combustible. Estas vagonetas se encuentran protegidas lateralmente por unas paredes

para evitar vientos laterales. La instalación dispone en un extremo de un ventilador para realizar quemas con una velocidad de viento determinada ($1 - 7 \text{ m/s}$). El espectrómetro de imagen IR se situó a una altura de unos 5 m y con un ángulo de observación cenital de unos 135° para simular la visión desde una torreta o helicóptero, quedando finalmente a una distancia en torno a 10 m de la vagoneta que aparece en el centro de las imágenes.

En la figura 6.13 (izquierda) puede verse esta instalación con el combustible (acícula de pino) uniformemente distribuido sobre las vagonetas antes de iniciar la quema y también la disposición del espectrómetro de imagen, situado al fondo en la parte derecha de la plataforma colocada sobre el ventilador (se aprecia también, sobre un trípode un espectrorradiómetro FTIR utilizado en otra serie de medidas). En dicha figura, a la derecha, se muestra el aspecto de una de las quemas realizadas. Las imágenes sobre las que vamos a simular los efectos de la distancia proceden de una quema realizada en ausencia de viento, y donde la ignición se originó en la zona de combustible más próxima a los equipos. Al avanzar la quema alejándose de éstos, detrás de la llama se tiene como fondo el combustible todavía no quemado.



Figura 6.13. – Fotografías del *túnel del fuego* en las que se muestra la configuración de medida y se puede ver el ventilador al fondo, termopares para medida de la temperatura en suelo, y la acícula de pino uniformemente distribuida en las vagonetas; antes de la quema (izquierda) y durante la quema (derecha).

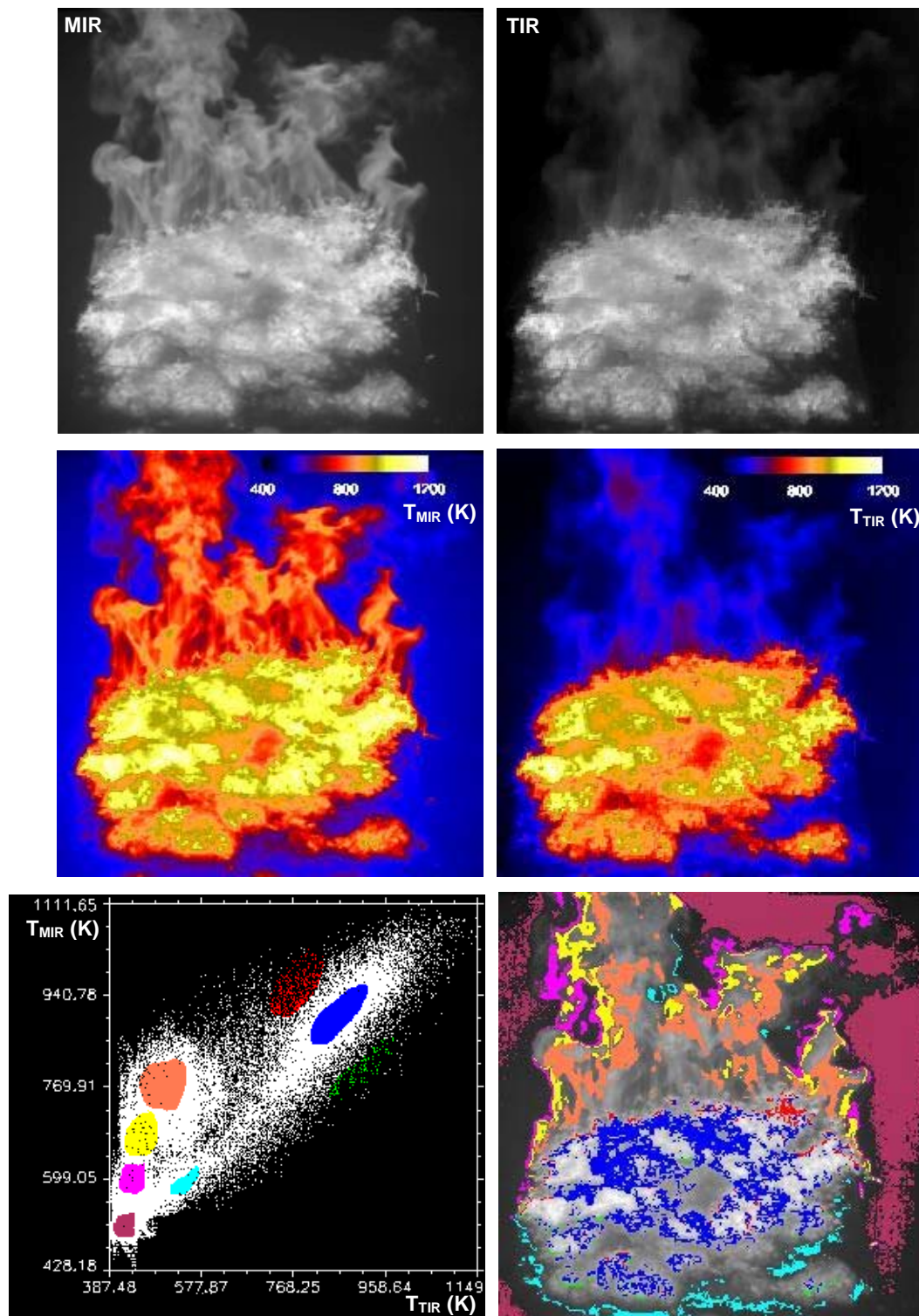
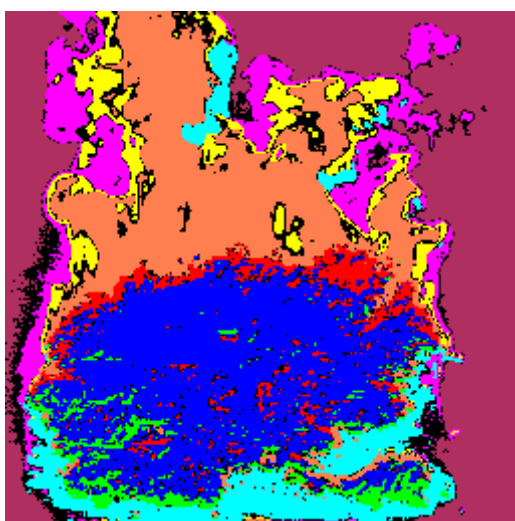


Figura 6.14. – Arriba, imágenes simultáneas, MIR y TIR, obtenidas con el espectrómetro de una de las quemaduras de acícula de pino realizadas en el *túnel del fuego*. En la parte central se observan en falso color y con escala de temperaturas. En la parte inferior se muestra su dispersograma con las clases de entrenamiento elegidas a partir de los *clusters* del dispersograma (izquierda) y su correspondencia sobre la imagen MIR (derecha).

La figura 6.14 muestra las imágenes simultáneas en las bandas MIR y TIR, co-registradas y calibradas en temperatura de brillo, en niveles de gris y con una paleta de color para realzar la información que contienen, y donde se indica, mediante una escala, el rango de temperaturas de brillo obtenido para cada banda. Si construimos el diagrama de dispersión (figura 6.14), vemos que aparecen claramente diferenciadas las dos ramas de puntos: la correspondiente a la llama con pendiente muy acusada y la correspondiente al rescoldo que sigue la tendencia de comportamiento de cuerpo negro o gris. La densidad de puntos y tamaño de las agrupaciones de píxeles son mayores ahora que en casos anteriores, debido a que la quema ocupa casi la totalidad del campo de visión del espectrómetro. Siguiendo el método descrito anteriormente, elegimos las clases de entrenamiento a partir de los *clusters* que aparecen en el dispersograma (figura 6.14).

El mapa de clases obtenido mediante el método de clasificación por máxima verosimilitud imponiendo que la probabilidad de pertenencia a una determinada clase sea del 90 % y el código de colores de las clases se muestra en la figura 6.15 (este código será el empleado en las siguientes clasificaciones). En él se aprecia claramente la distinción entre regiones de llama a diferentes temperatura, y de rescoldo en diferentes fases. Incluso se puede diferenciar el frente de llama con forma de óvalo típica, formado por la clase de rescoldo con llama (rojo) y las cenizas que se acumulan en la parte de delante y en los bordes, donde todo el combustible ha sido quemado. La zona de rescoldo más frío (verde) corresponde a la última fase de combustión con acumulación de cenizas, por lo que su temperatura de brillo es menor que en el rescoldo más activo.



Clases	Color
Rescoldo vivo	Azul
Rescoldo con llama	Rojo
Rescoldo más frío	Verde
Cenizas	Cian
Llama intensa	Naranja
Llama media	Amarillo
Llama débil	Magenta
Fondo	Marrón

Figura 6.15. – Mapa de clases obtenido eligiendo las clases de entrenamiento en el dispersograma de la figura 6.14 mediante el método de clasificación supervisada de máxima verosimilitud.

La aparición de la clase que representa la ceniza en la zona superior de llama débil puede deberse a algún fallo en la co-registración, debido a la dificultad que presenta este tipo de transformaciones geométricas para imágenes que no están tomadas a nadir, y en las que por tanto no puede considerarse que la información que contienen pertenece a un mismo plano. La dificultad se agrava cuando, como aquí, la distancia es corta, pues el efecto del paralaje entre las dos cámaras es muy acentuado.

Degradación espacial y radiométrica para una distancia de 1 km

Simulamos ahora los efectos de la degradación radiométrica y espacial que se producirían al tomar las imágenes anteriores desde una distancia de 1 km con el espectrómetro de imagen.

Degradación radiométrica

A una distancia de 1 km, a pesar de trabajar en ventanas transmisión, se debe tener en cuenta la atenuación debida a la absorción atmosférica. Para realizar esta degradación es necesario conocer la transmitancia atmosférica para unas condiciones determinadas de humedad relativa, temperatura y concentración de aerosoles. En la figura 6.16 se muestra la transmitancia atmosférica espectral para 1 km de distancia calculada con MODTRAN utilizando el modelo atmosférico *Midlatitude Summer* y para un ambiente rural con una visibilidad de 23 km y una concentración de CO₂ de 350 ppm en volumen [Ontar 96].

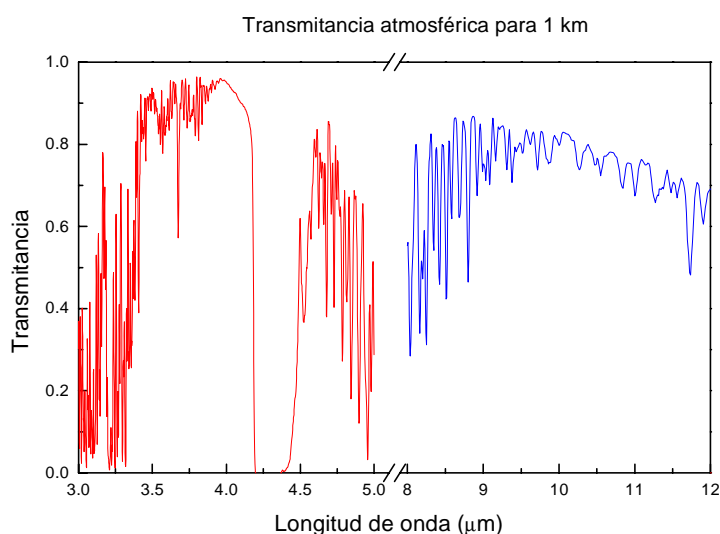


Figura 6.16. – Transmitancia atmosférica espectral para 1 km de distancia calculada mediante MODTRAN utilizando el modelo atmosférico *Midlatitude Summer*, para un ambiente rural con visibilidad de 23 km y con una concentración de CO₂ de 350 ppm en volumen.

Estudiando esta gráfica se observa que la absorción afecta de una manera muy acusada y en una banda estrecha a la región MIR, debido a la absorción del CO₂ atmosférico (apartado 2.3.2). Este carácter selectivo impide utilizar una transmitancia promedio para toda la banda. Además, en el escenario que queremos simular existen llamas, cuya emisión se debe principalmente al CO₂ a alta temperatura y que por tanto será atenuada en mayor medida que la emisión producida por un cuerpo negro. Por el contrario, la atenuación producida en la región TIR se debe a la absorción del agua principalmente y afecta de la misma forma prácticamente a toda la banda (figura 6.16), por lo que podremos utilizar una transmitancia promedio.

Teniendo en cuenta todos estos factores, el procedimiento seguido para la aplicación de la transmitancia atmosférica a las imágenes adquiridas a corta distancia de la quema de acícula de pino ha sido el siguiente. En primer lugar y teniendo en cuenta la clasificación realizada para este escenario (figura 6.15), dividirlo en tres grandes clases: *llama*, que comprende las clases de llama intensa, media y débil; *rescoldo con llama*; y *cuerpo negro o gris* que comprenden el resto de clases. En segundo lugar, se ha calculado una transmitancia promedio, para la distancia de 1 km, diferente para cada una de estas tres grandes clases. Las expresiones a través de las cuales se ha calculado la transmitancia promedio para la clases *llama* ($\tau_{\text{prom_llama}}$) y *llama con rescoldo* ($\tau_{\text{prom_llama+rescoldo}}$) son las siguientes²:

$$\tau_{\text{prom_llama}} = \frac{\int_3^5 \tau_{\text{atm_1km}}(\lambda) \cdot L_{\text{llama}}(\lambda) d\lambda}{\int_3^5 L_{\text{llama}}(\lambda) d\lambda} \quad [6.1]$$

$$\tau_{\text{prom_llama+rescoldo}} = \frac{\int_3^5 \tau_{\text{atm_1km}}(\lambda) \cdot L_{\text{llama+rescoldo}}(\lambda) d\lambda}{\int_3^5 L_{\text{llama+rescoldo}}(\lambda) d\lambda} \quad [6.2]$$

donde,

$\tau_{\text{prom_llama}}$ = transmitancia atmosférica promedio para 1 km (clase *llama*).

$\tau_{\text{prom_llama+rescoldo}}$ = transmitancia atmosférica promedio para 1 km (clase *llama con rescoldo*).

$\tau_{\text{atm_1km}}(\lambda)$ = transmitancia atmosférica espectral para 1 km.

$L_{\text{llama}}(\lambda)$ = radiancia espectral emitida por la llama.

$L_{\text{llama+rescoldo}}(\lambda)$ = radiancia espectral emitida por la llama con rescoldo.

² La radiancia espectral para la llama y rescoldo con llama, fue medida durante la misma quema mediante espectrorradiometría FTIR.

Para el resto de clases de la imagen MIR, se ha calculado la transmitancia promedio a partir de la transmitancia atmosférica espectral para la distancia de 1 km que aparece en la figura 6.15, teniendo en cuenta el ancho de banda correspondiente; análogamente se ha hecho para todas las clases en la banda TIR. Los valores obtenidos se reflejan en la tabla 6.3.

Banda espectral	Clase	Transmitancia (1 km)
MIR (3 – 5 μm)	$\tau_{\text{prom_llama}}$	0.2426
	$\tau_{\text{prom_llama+rescoldo}}$	0.4617
	$\tau_{\text{prom_MIR}}$	0.5476
TIR (8 – 12 μm)	$\tau_{\text{prom_TIR}}$	0.7259

Tabla 6.3. – Transmitancias atmosféricas promedio para 1 km de distancia, obtenidas para la banda TIR y para las tres *clases* consideradas en la región MIR.

Una vez obtenidas las diferentes transmitancias para la distancia de 1 km, se aplicarán sobre la imagen original de la quema de acícula calibrada en radiancias. Para la banda MIR se hace de una forma selectiva teniendo en cuenta la clasificación realizada (figura 6.15). Para la banda TIR se aplica la transmitancia promedio a toda la imagen. Es claro que las temperaturas de brillo aparentes disminuirán en ambas bandas, pero algo más en la MIR, y que esta disminución será mucho más acentuada para la región de llama, por lo que cabe esperar una modificación del dispersograma.

Hay que advertir que en esta degradación radiométrica no se ha utilizado un modelo atmosférico completo, pues no se ha tenido en cuenta la emisión atmosférica ni la dispersión. Estos efectos aunque afectan poco a los píxeles de alta temperatura, tienen una contribución apreciable en los del fondo.

Degradación espacial

La degradación espacial consiste en la pérdida de resolución espacial producida por el alejamiento de los equipos para la toma de medidas.

Las imágenes de partida en ambas bandas, una vez co-registradas, son de 256x256 píxeles, con un IFOV = 0.76 mrad, y por tanto su tamaño de píxel, al estar tomadas a unos 10 m, es de 7.6 mm. Se han degradado espacialmente hasta un tamaño de 16x16 píxeles. La resolución espacial de los nuevos píxeles para una distancia de 1 km sería ahora de 122 mm. Esta resolución no se puede alcanzar con la óptica del

espectrómetro de imagen utilizado, pero se podría conseguir con una óptica adecuada para ambas bandas, cuya distancia focal estaría entorno a los 250 mm.

La simulación de esta pérdida de resolución espacial se ha realizado sobre las imágenes originales calibradas en radiancia, a las que se había aplicado la degradación radiométrica. El valor de cada uno de los píxeles de la nueva imagen se ha obtenido promediando las radiancias de los 16x16 píxeles de los cuales procede. A partir de esta imagen y utilizando las funciones de calibrado correspondientes, se obtienen las imágenes en temperatura de brillo para cada banda (figura 6.17). Las imágenes se muestran con un zoom digital x20, en falso color y con una escala de temperatura de brillo, para poder ver la información se obtiene después de haber sido degradadas. Se puede apreciar que aún se puede distinguir información de la llama en la imagen MIR.

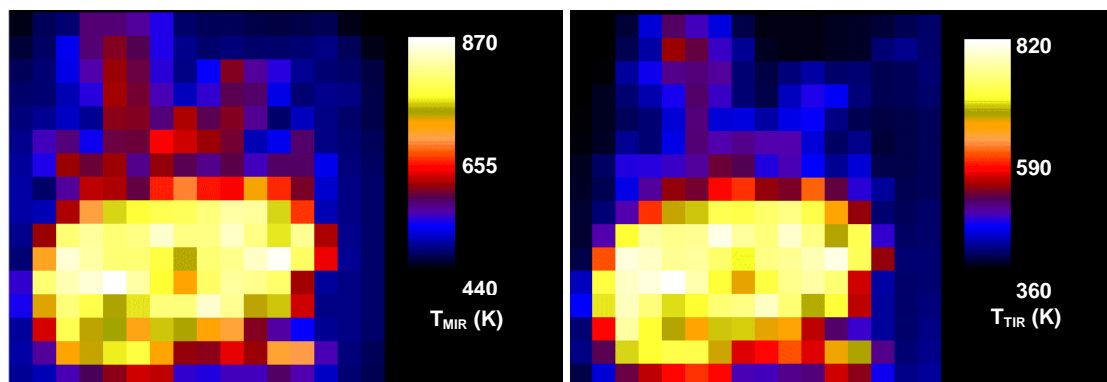


Figura 6.17. – Imágenes de la quema de acícula de pino realizada en el *túnel del fuego* (figura 6.13) degradadas radiométrica y espacialmente para una distancia de 1 km. Se muestran calibradas en temperatura de brillo y con un zoom digital x20, siendo el tamaño de píxel de 0.12 m.

Clasificación del escenario a 1 km de distancia

Si estudiamos el dispersograma de las imágenes de la figura 6.17, mostrado en la figura 6.18, se puede comprobar que aún sigue teniendo cierta estructura, aunque ahora la densidad y tamaño de las agrupaciones de puntos es mucho menor debido al tamaño de la imagen. La estructura que menos se altera, respecto al dispersograma a corta distancia, es la rama con comportamiento de cuerpo gris, correspondiente a las clases de rescoldo. La rama perteneciente a la llama ahora se separa muy poco de la rama de rescoldo, como era de esperar en virtud de que la transmisión promedio MIR es menor que para las otras clases, y por ello la pendiente de esta rama se acerca a la de cuerpo negro. No obstante todavía es posible distinguir incluso dos clases de llama en el dispersograma.

La figura 6.18 (arriba izquierda) muestra el diagrama de dispersión donde se ha realizado la elección de las clases de entrenamiento. En este caso, por claridad, se ha

representado esta elección en otro dispersograma (arriba derecha) en el que sólo aparecen las agrupaciones seleccionadas como clases de entrenamiento y donde se indica el código de colores utilizado. La correspondencia de estas clases de entrenamiento sobre la imagen MIR se pueden ver en la figura 6.18 (abajo izquierda). El mapa de clases obtenido mediante el método de clasificación supervisada de máxima verosimilitud, imponiendo una probabilidad para pertenecer a una de las clases de entrenamiento del 90 %, como en anteriores ocasiones, se muestra en dicha figura abajo a la derecha.

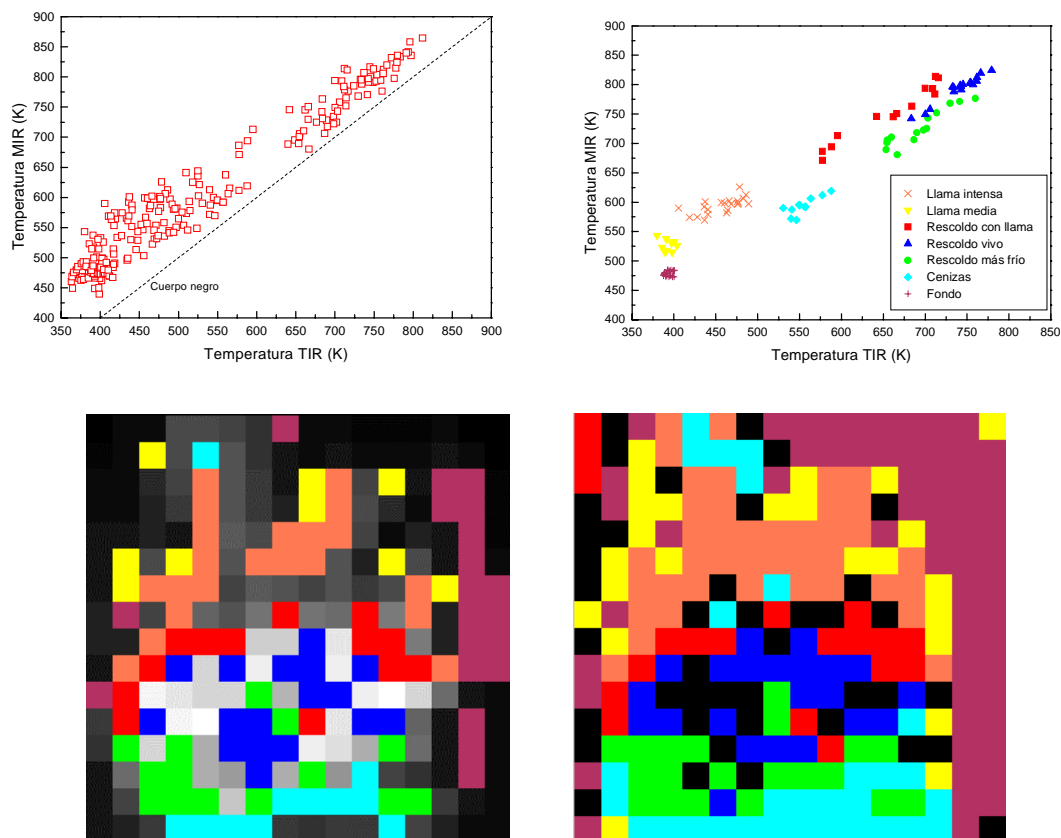


Figura 6.18. – Arriba: a la izquierda se muestra el dispersograma de las imágenes de la figura 6.17 y en línea discontinua $T_{MIR} = T_{TIR}$; a la derecha se muestra en otro dispersograma (por claridad) la elección realizada de las clases de entrenamiento y el código de colores utilizado para las clases. Abajo: a la izquierda se puede ver su correspondencia sobre la imagen MIR; a la derecha aparece el mapa de clases obtenido mediante el método de clasificación supervisada de máxima verosimilitud.

Podemos concluir que pese a la degradación del dispersograma todavía es posible clasificar la escena, e incluso distinguir clases de llama. Este resultado es interesante, porque la mayoría de estudios de fuegos forestales en el IR a larga distancia ignoran la emisión de la llama. Así, por ejemplo, en una imagen AVHRR un fuego generalmente aparece como un píxel donde la temperatura MIR (canal 3) es superior a la TIR (canal 4). Este píxel es modelado como un cuerpo negro subpíxel a alta

temperatura, rodeado de un cuerpo negro frío correspondiente al fondo. El tamaño y la temperatura del fuego se estiman a partir de la temperatura de ambas bandas mediante el algoritmo clásico de Dozier (sección 6.4, [Dozier 81]). Este procedimiento, en el que se desprecia la emisión de la llama, está justificado debido a que se trata de imágenes de satélite donde la llama ha sido fuertemente atenuada y cuyo objetivo es dar sólo una primera aproximación de los parámetros del fuego, pero no implica que la emisión de la llama pueda ser despreciada en otras circunstancias. En particular, nuestra simulación muestra que para imágenes obtenidas desde una plataforma aérea a una distancia aproximada de 1 km la emisión de la llama todavía sería apreciable.

6.4. Clasificación del escenario IR en un incendio forestal: generación de mapas temáticos

La simulación de los efectos de la distancia descritos en la sección anterior va a resultar útil para interpretar las imágenes de incendios reales, adquiridas con el espectrómetro de imagen IR construido, desde un helicóptero, a una distancia en torno a 1.5 km.

Las medidas fueron realizadas en el Parque Regional Pata del Caballo, situado en Huelva, donde se hicieron quemas controladas por parte de personal especializado del Servicio de Lucha Contra Incendios Forestales de la Junta de Andalucía, dentro del proyecto europeo “FUEGO 2: *Instrument Design Prototype Construction and Validation*”, financiado por la Comisión Europea dentro del *IV Framework Programme* (programa *Environment & Climate*).

Las medidas fueron tomadas desde un helicóptero Bell 205, de los utilizados por el Servicio de Lucha Contra Incendios Forestales de la Junta de Andalucía. Para ello hubo que realizar las modificaciones necesarias en el espectrómetro de imagen IR para su correcto funcionamiento y ubicación en esta plataforma aérea (sección 3.3). En la figura 3.13 se muestra una fotografía del mismo instalado en el helicóptero Bell 205.

Las quemas se realizaron en una parcela con una pendiente de unos 30° y cuya masa forestal estaba constituida por matorral bajo y pinos, delimitado por cortafuegos (figura 6.19). La configuración de medida se puede apreciar en la fotografía de la figura 6.19, tomada desde el helicóptero, que volaba en círculos con un radio de 1.3 km aproximadamente y a una altura entre 400 y 700 m, sobre el trozo de terreno donde se

realizó la quema, siendo por tanto la distancia desde el helicóptero a la zona de la quema en torno a 1.5 km y la resolución espacial de las imágenes IR en torno a 1 m.

Las medidas fueron realizadas en noviembre, con una temperatura ambiente de 14 °C y una humedad relativa del 60 %. Debido al alto grado de humedad de la vegetación resultó difícil iniciar el fuego y no se propagó como se esperaba, por lo que sólo una parte del terreno fue quemada, a pesar de que las quemas se iniciaron en varios focos.

En la figura 6.20 se muestran las imágenes MIR y TIR simultáneas, co-registradas y calibradas en temperaturas de brillo, a las que se les ha aplicado una paleta de falso color y de las que se ha seleccionado la zona de la quema. Estas imágenes se han ampliado digitalmente para apreciar más claramente la existencia de varios focos, además de los dos más activos, situados en las esquinas de la base del triángulo que delimita el terreno de la quema, y que se pueden identificar en la imagen visible por las columnas de humo. Para evitar la saturación de las imágenes se utilizó un filtro neutro con una transmisión del 1 % en la cámara MIR y un diafragma de 20 mm de diámetro en la cámara TIR. Esta atenuación es la responsable de que no se puedan apreciar detalles del fondo en las imágenes IR.

En el diagrama de dispersión (figura 6.21 izquierda) se observa que la densidad de puntos es mucho menor que en anteriores ocasiones debido al pequeño tamaño relativo de los focos de incendios. Pese a esta escasez de puntos es posible distinguir dos tendencias basándonos en los estudios previos de diferentes quemas y llamas a distancias más cortas y en la simulación realizada. Una de estas tendencias sigue el comportamiento de cuerpo negro con una pendiente cercana a la unidad, mientras que otra serie de puntos con una pendiente más acusada indican la presencia de llama. Elegimos las clases de entrenamiento siguiendo los criterios utilizados en anteriores quemas, y de nuevo por claridad, se muestran en otro dispersograma donde sólo aparecen los puntos que las forman (manteniendo el código de colores, figura 6.21 arriba derecha). La correspondencia de las clases de entrenamiento elegidas se muestran sobre la imagen MIR en la figura 6.21 (centro).



Figura 6.19. – Imagen visible de la parcela donde se realizaron las quemas controladas, tomadas desde el helicóptero y que muestra la configuración de medida. El recuadro señala el FOV de las imágenes IR del espectrómetro.

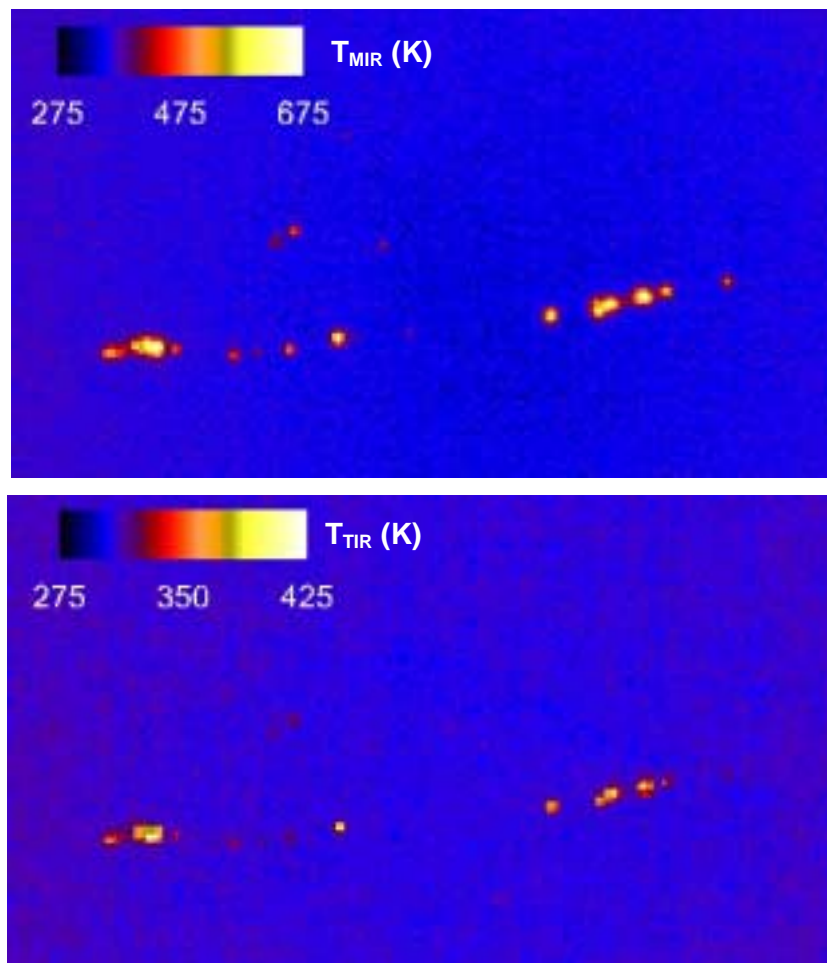


Figura 6.20. – Imágenes, MIR y TIR, ampliadas digitalmente de la zona de la quema. Las imágenes son simultáneas, co-registradas y calibradas en temperatura de brillo.

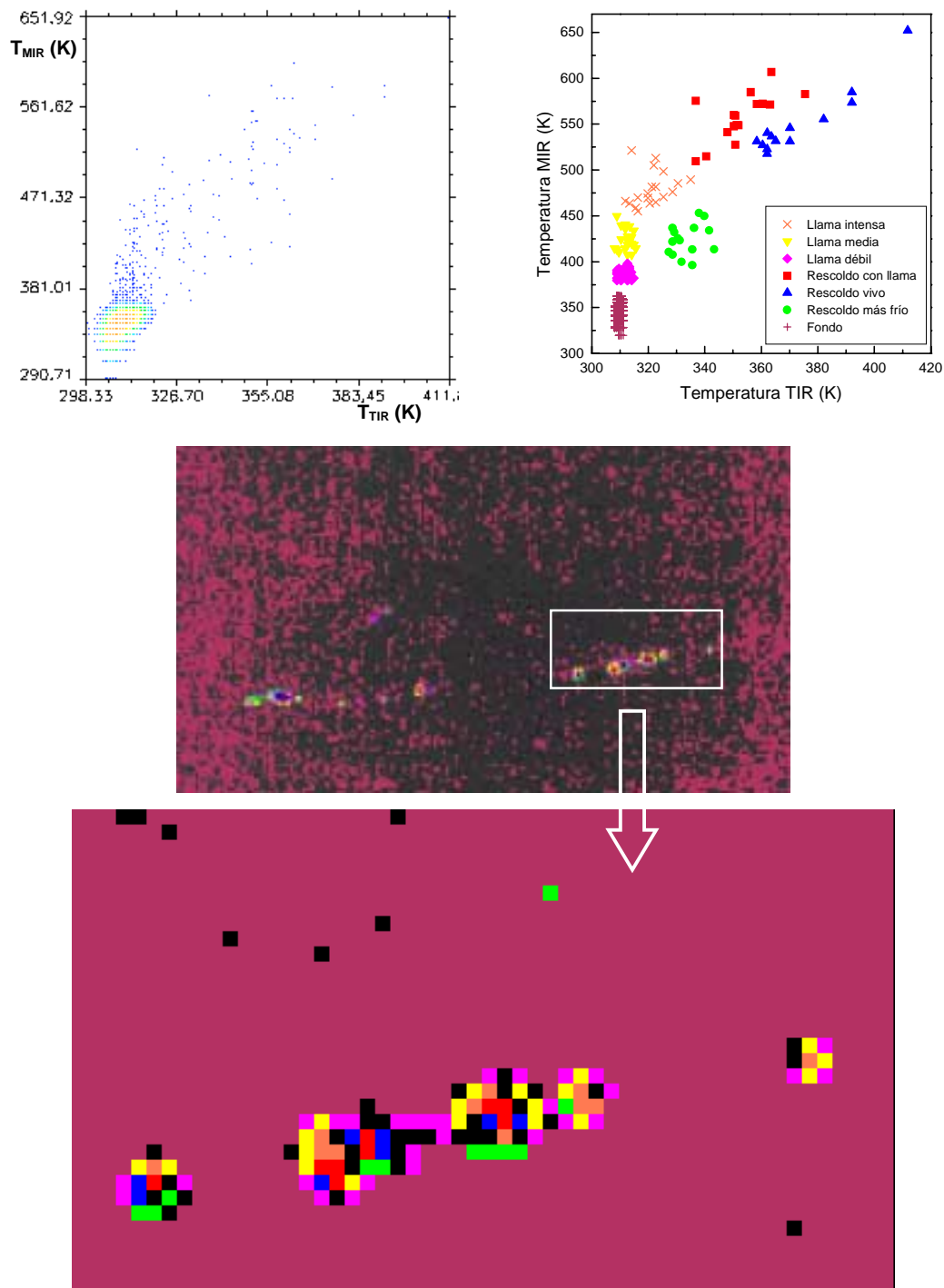


Figura 6.21. – Arriba: a la izquierda diagrama de dispersión de las imágenes de la figura 6.20, donde se muestra la densidad de las agrupaciones; a la derecha el dispersograma muestra la elección de clases de entrenamiento a partir de los *clusters*. Centro: correspondencia de las clases de entrenamiento sobre la imagen MIR. Abajo: detalle del mapa de clases obtenido por el método de máxima verosimilitud.

El mapa de clases se ha obtenido mediante el método de máxima verosimilitud. En él se distinguen claramente (ver detalle en la figura 6.21 abajo) las clases que representan las zonas de llama pura (magenta, amarillo y naranja) que rodean a la clase

donde se produce la emisión conjunta del rescoldo con llama de la vegetación ardiendo (rojo). Esto ocurre en los focos más activos del incendio, situados en los extremos de la base de la ladera donde se realizó la quema y que se distinguen por las columnas de humo en la imagen en visible. En el mapa de clases se pueden localizar también focos más débiles que no se aprecian en el visible. En ellos se encuentran clases de llama débil (magenta y amarillo), indicativos de fuegos incipientes. Las clases azul y verde, de emisión de cuerpo gris, que corresponderían al rescoldo, están representadas sólo por unos pocos píxeles cerca de los focos más activos. Esto es consecuencia del escaso desarrollo que tuvo la quema debido a la humedad de la vegetación. También se puede apreciar que los píxeles de rescoldo frío (verdes) aparecen preferentemente en la base de los focos, como era de esperar de acuerdo con la evolución de la quema, que progresaba como es habitual ladera arriba.

Al interpretar los resultados de este estudio experimental de incendios desde larga distancia, nos hemos guiado por los resultados a corta distancia expuestos en la sección 6.2 y la simulación de la degradación espacial y radiométrica debida a la distancia descrita en la sección 6.3. El objetivo inicial era mostrar que el método de clasificación desarrollado para medidas de laboratorio (sección 6.1) es aplicable a imágenes de incendios reales. Pero, a la vez, los resultados que hemos expuesto aquí proporcionan una validación del procedimiento de simulación, que tiene un interés intrínseco, ya que puede suponer un importante ahorro de medios al permitir sacar conclusiones sobre la metodología para clasificación de imágenes de incendios a partir de datos experimentales de laboratorio o a los sumo del túnel del fuego.

Como se verá más adelante, el procedimiento y la metodología que permiten degradar imágenes próximas hasta simular adquisiciones remotas es extensible a análisis diferentes de los incendios forestales.

6.5. Estudio de la influencia de los reflejos solares

Una de las fuentes más frecuentes de falsas alarmas y que, por tanto, merece un estudio particular, son los reflejos solares.

En primera aproximación, podemos modelizar un objeto que produce un reflejo solar por una cierta reflectancia efectiva, ρ_{ef} , que supondremos independiente de la

longitud de onda. La radiancia reflejada por este objeto será la radiancia solar (de un cuerpo negro de unos 5800 K) multiplicada por esa reflectancia. La reflectancia efectiva será generalmente bastante baja, pues los reflejos solares especulares son raros, pero incluso en los casos de reflejos difusos, esta componente reflejada puede suponer un aumento considerable en la temperatura de brillo aparente. Un rasgo importante de este aumento de temperatura aparente es que no tiene el mismo valor en la banda MIR que en la banda TIR.

En la figura 6.22 se representa la radiancia espectral saliente de un hipotético reflejo solar con una reflectancia efectiva de 10^{-3} . Una cámara térmica operando en $4\text{ }\mu\text{m}$ interpretaría esa radiancia como proveniente de un cuerpo negro a 520 K, mientras que una cámara que trabajase en $10\text{ }\mu\text{m}$ se la atribuiría a un cuerpo negro a 260 K. Esta discrepancia se debe a que la composición espectral del reflejo no corresponde a un cuerpo negro, sino que está enriquecida en longitudes de onda corta. Por esta razón, los reflejos solares aparentan tener una temperatura mayor en la banda MIR que en la banda TIR.

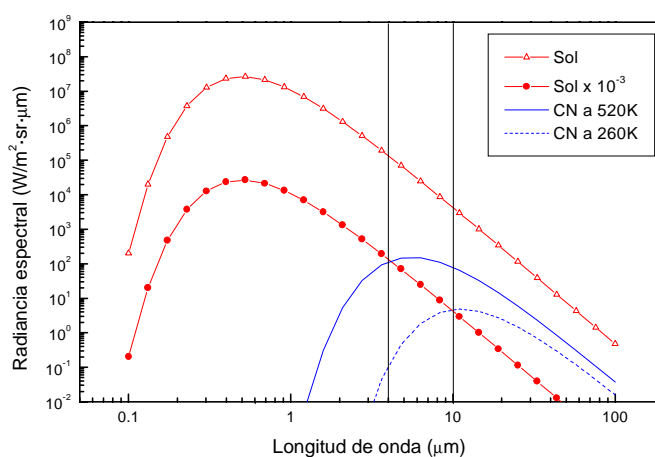


Figura 6.22. – Cálculo de la temperatura aparente que produciría un reflejo solar en $4\text{ }\mu\text{m}$ y $10\text{ }\mu\text{m}$, para una reflectancia efectiva de 10^{-3} .

La diferencia de temperaturas es función de la reflectancia efectiva ρ_{ef} , como se puede apreciar en la figura 6.23, en la que las temperaturas aparentes MIR y TIR se representan para varios valores de ρ_{ef} . Para valores grandes de ρ_{ef} la temperatura en ambos canales tiende a la temperatura solar, mientras que cuando ρ_{ef} tiende a cero, ambas temperaturas tienden a la temperatura ambiente (293 K para la figura 6.23). En los valores intermedios de reflectancia es donde las discrepancias entre las temperaturas

son mayores. Sin embargo, estos valores de reflectancia son sumamente improbables en escenarios realistas, como muestra la estimación de las reflectancias eficaces de algunos reflejos encontrados en escenarios reales (tabla 6.4), basada en la figura 6.23.

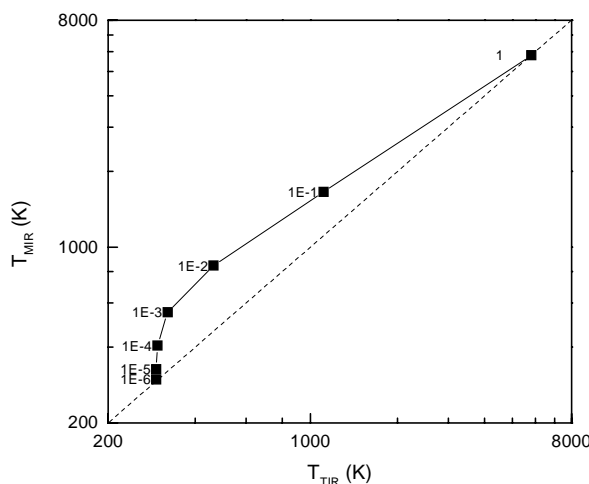


Figura 6.23. – Temperaturas aparentes en la banda MIR y TIR para reflejos solares con diferentes reflectancias efectivas desde 1 a 10^{-6} .

Objeto	T_{MIR} (K)	T_{TIR} (K)	ρ_{ef} estimada
alfeizar de ventana	299	293	$1.0 \cdot 10^{-6}$
tejado	298	291	$1.5 \cdot 10^{-6}$
chapa de aluminio	311	298	$3.0 \cdot 10^{-6}$
mar	325	281	$1.0 \cdot 10^{-5}$

Tabla 6.4. – Reflectancias eficaces estimadas a partir de las temperaturas de brillo MIR y TIR, para reflejos solares encontrados en diferentes escenarios reales.

La figura 6.24 permite apreciar este efecto en una escena real. En (1) se muestra una imagen MIR del perfil de una ciudad, obtenida a mediodía. El dispersograma MIR-TIR (2) muestra dos cúmulos principales: a la izquierda, una rama con pendiente menor que uno y temperaturas MIR mayores que las TIR; a la derecha, un núcleo situado aproximadamente sobre la diagonal $T_{MIR} = T_{TIR}$. Al distinguir clases en función de la posición en el dispersograma (3 y 4), vemos que la rama de la izquierda la forman los píxeles de la atmósfera, y que, como era de esperar, su temperatura aparente disminuye con la altura. Además, en todo el cielo $T_{MIR} > T_{TIR}$, y esta diferencia aumenta con la altura, como corresponde a mayor peso de la dispersión solar en la radiancia. El núcleo de la derecha corresponde a edificios, con un comportamiento de cuerpo gris y temperaturas aparentes bastante homogéneas (algo más frías en la clase marcada en

rojo). Hay que destacar que por encima de este núcleo hay puntos a temperaturas aparentes más altas, en los que de nuevo $T_{MIR} > T_{TIR}$, y que corresponden a reflejos solares difusos.

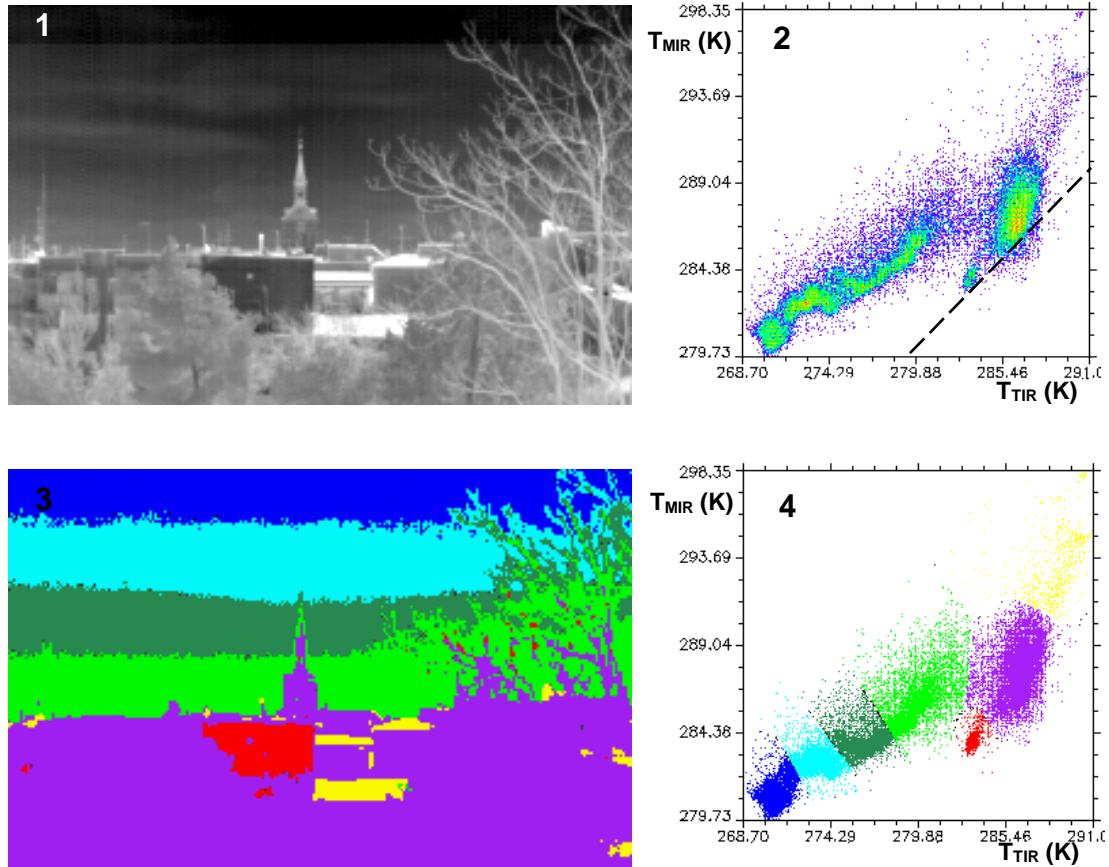


Figura 6.24. – (1) Imagen MIR de una ciudad; (2) dispersograma de las temperaturas de brillo aparentes MIR y TIR, en el que se ha marcado con una línea discontinua donde $T_{MIR} = T_{TIR}$; (3) mapa de clases obtenido a partir de la selección indicada en el dispersograma (4).

Otro ejemplo de reflejos solares, en este caso sobre el mar, se muestra en la figura 6.25. Se aprecia, sobre todo en la imagen MIR (1) un reflejo solar muy marcado en el horizonte, aunque en todo el mar hay reflejos en menor medida. En el dispersograma se han señalado, mediante elipses, agrupaciones de píxeles cuya correspondencia (en el mismo color) se muestra sobre la imagen MIR (3). Es de destacar la rama casi vertical correspondiente al reflejo en el horizonte (y a una pequeña zona en las crestas de las olas que rompen en la playa). Claramente un *cluster* de este tipo, en el escenario de un incendio, podría dar problemas en cuanto al método de clasificación, pues es susceptible de confundirse con una llama. El problema es, en el fondo, él ya encontrado en la sección 5.4 donde se comparan los índices de fuego

interbanda (MIR-TIR) e intrabanda (dos bandas en el MIR): los reflejos solares se discriminan muy bien en el índice intrabanda pero no en el interbanda.

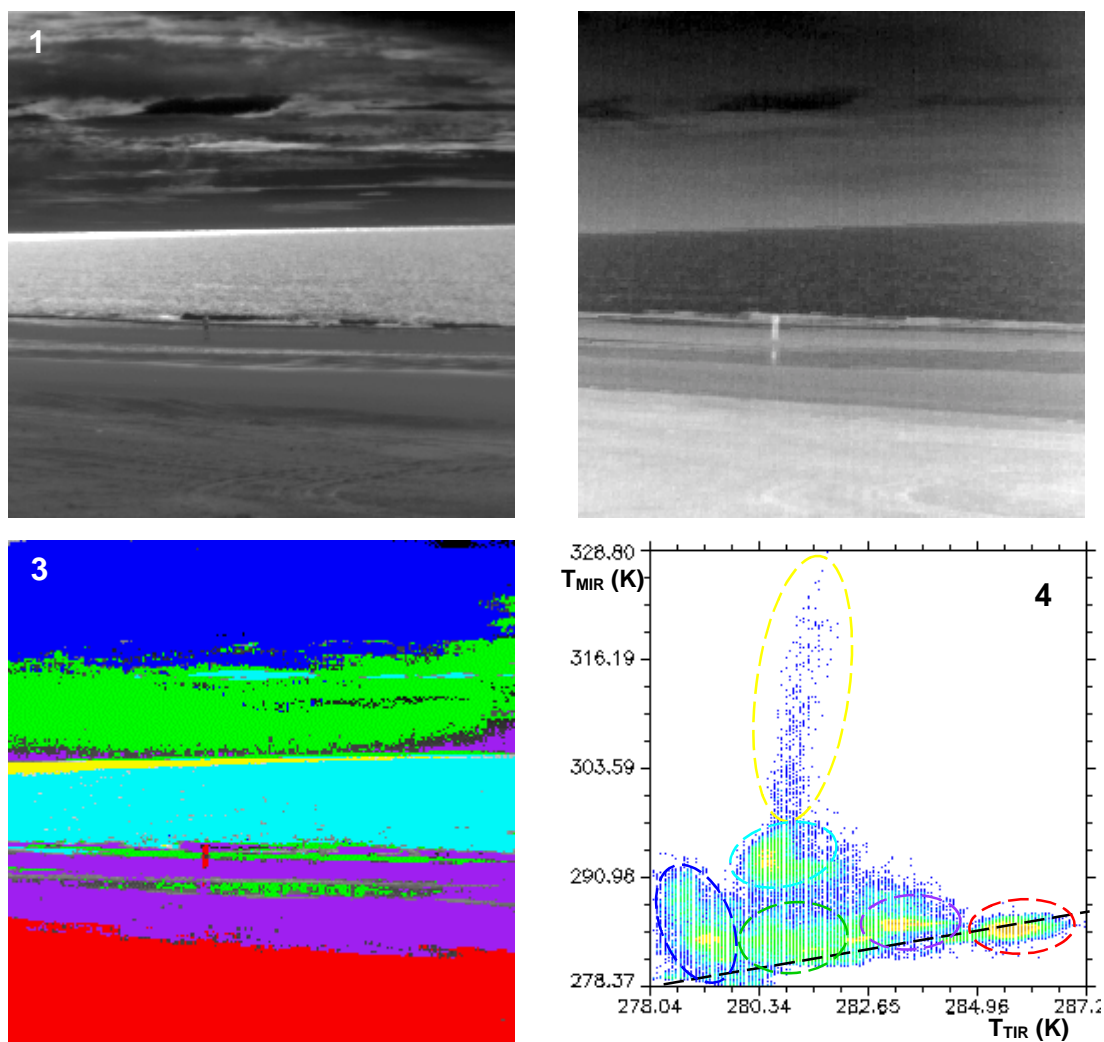


Figura 6.25. – Imágenes MIR (1) y TIR (2) del horizonte marino. Puede apreciarse claramente un reflejo solar sobre el mar, en el horizonte, imagen MIR (2). En el correspondiente dispersograma de las temperaturas de brillo aparentes (4) se observan diferentes agrupaciones de píxeles (donde el color indica la densidad de las mismas), de las que se han señalado algunas de ellas mediante elipses, cuya correspondencia se muestra sobre la imagen MIR en (3).

Pese a la mayor potencia de los métodos de clasificación para identificación, comparados con los índices de fuego utilizados para detección, aquellos no pueden superar limitaciones que son intrínsecas a las bandas espectrales de trabajo. No obstante, hay dos características de los reflejos solares que facilitan su discriminación de las llamas en las imágenes MIR-TIR. Por una parte, los valores de reflectancia efectiva de los objetos que pueden encontrarse en situaciones ordinarias son muy bajos (tabla 6.4) y dan lugar a temperaturas de brillo aparentes MIR más bajas que las que cualquier llama. Incluso en un caso como el de la figura 6.17, en el que la llama ha sufrido una gran

atenuación atmosférica, su temperatura de brillo aparente T_{MIR} es bastante mayor que la del reflejo solar más intenso que hemos encontrado en un escenario real (figura 6.25). Por otra parte, los reflejos solares intensos como el de la figura 6.26 dan ramas prácticamente verticales en el dispersograma, mientras que en las llamas tienen siempre cierta inclinación, especialmente en escenarios realistas en las que se ven contra un fondo de suelo caliente.

Conclusiones del capítulo

En este capítulo se ha expuesto un método para la clasificación e identificación de regiones en incendios forestales, basado en el análisis del dispersograma de temperatura de brillo aparentes en las bandas MIR y TIR. El dispersograma se obtiene de las imágenes biespectrales proporcionadas por el espectrómetro descrito en el capítulo 3. La potencia del método de clasificación expuesto, basado en la elección de las clases de entrenamiento en el dispersograma, demostrada para fuegos de laboratorio y exteriores a distancias cercanas, ha sido verificada satisfactoriamente para un escenario típico de un incendio forestal real, mediante las imágenes tomadas, desde un helicóptero, con el espectrómetro biespectral de imagen IR construido. Aunque el incendio forestal medido no fue de grandes dimensiones, las medidas han sido muy útiles para la detección de fuegos incipientes a gran distancia y para la localización de rescoldo, causantes generalmente del reavivamiento de un incendio forestal, en zonas supuestamente controladas o aparentemente extinguidas, en el espectro visible.

Además de aplicar el método a diversos fuegos de laboratorio y reales, se han estudiado dos efectos que pueden complicar el análisis del dispersograma: la presencia de focos calientes de tamaño subpíxel y los reflejos solares. La clasificación proporcionada por nuestro método ha demostrado también su utilidad para simular adecuadamente los efectos de la distancia sobre las imágenes biespectrales, lo que constituye una herramienta muy valiosa para el estudio de la clasificación de imágenes a grandes distancias a partir de imágenes obtenidas en laboratorio o a cortas distancias.

Capítulo 7

Optimización de la detección mediante espectrometría de imagen IR de alta resolución

El objetivo principal de este trabajo es, como se ha indicado antes en esta memoria, optimizar los procesos de detección y clasificación de objetos en un escenario IR, haciendo uso de su comportamiento espectral característico. En los capítulos anteriores de esta memoria la resolución espectral ha sido la mínima posible en IR, pues se han usado imágenes en tan sólo dos bandas, las ventanas atmosféricas del infrarrojo medio y térmico¹. Pese a esta limitación, se ha demostrado que estas imágenes permiten resolver problemas inabordables para la termografía convencional, como la detección del fuego discriminando falsas alarmas (capítulo 5) y la clasificación del escenario IR en un incendio forestal (capítulo 6).

Estas aplicaciones sólo son posibles cuando las imágenes en ambas bandas son simultáneas, co-registradas y comparables radiométricamente; es decir, cuando proceden de *un espectrómetro de imagen*. Hay que recalcar que entonces no tenemos la simple yuxtaposición de dos cámaras sino un instrumento nuevo como el construido en este trabajo y que se detalla en el capítulo 3.

Una de las conclusiones que podemos extraer de los capítulos precedentes es que estos requisitos de “correlación” (temporal, espacial, y radiométrica) entre imágenes son más importantes que el mero número de bandas. Reviste por tanto gran interés estudiar las posibilidades que ofrecen los espectrómetros de imagen con un número pequeño de bandas (del orden de cinco o menos). Estos sistemas multispectrales pueden ser desarrollados a partir de cámaras infrarrojas convencionales dotadas de un sistema sencillo de selección de la longitud de onda, como puede ser una rueda de filtros

¹ Excepto en el índice de fuego intrabanda (sección 5.2), que utilizaba dos bandas en la región MIR.

interferenciales. Este tipo de sistema no lograría una perfecta simultaneidad entre imágenes de diferentes bandas, pero esto no sería un inconveniente para aplicaciones cuyos tiempos característicos sean más largos que el periodo de giro de la rueda. Por otra parte, los requisitos de correlación espacial y radiométrica estarían garantizados al utilizar la misma cámara para las dos bandas.

En los sistemas multiespectrales del tipo descrito, un parámetro crítico es la selección de los canales: su número, su posición espectral y su anchura deben optimizarse para cada aplicación específica. Para esta tarea es necesaria una caracterización espectral que obviamente no puede limitarse a unas pocas longitudes de onda y requiere un instrumento de alta resolución. Esta resolución espectral la puede proporcionar un espectrorradiómetro o un espectrómetro de imagen IR de alta resolución. Los primeros proporcionan una resolución espectral óptima, al precio de perder toda la resolución espacial. Los segundos no son todavía una instrumentación estándar, debido a su reciente aparición y a su gran complejidad [website 6][website 7][website 8][IMSS 97][Schott 97][Wolfe 97], con los consiguientes inconvenientes de alto precio, pero su elevada resolución, tanto espacial como espectral, proporciona una información imprescindible para caracterizar detalladamente el escenario IR. La aplicación de la espectrometría de imagen IR de alta resolución, por tanto, puede resultar clave para la optimización de la detección basada en sistemas de imagen IR convencionales. En este capítulo se ha utilizado un espectrómetro en el MIR, IMSS (sección 3.4), para proporcionar la caracterización espectral necesaria para la propuesta de sistemas multiespectrales específicos.

Las imágenes hiperespectrales son particularmente útiles para nuestro objetivo porque sirven como punto de partida de alta resolución espectral (muchas bandas) y cuyo análisis permite establecer las longitudes de onda de centrado, el número mínimo de bandas y su anchura máxima, con las que un sistema multiespectral (pocas bandas), menos complejo y más barato, podría resolver el problema de detección planteado. La metodología utilizada en este capítulo parte de un análisis de alta resolución espacial y espectral mediante el sistema de imagen hiperespectral, para caracterizar el objeto o blanco a estudiar en los diferentes escenarios de interés. Posteriormente, se obtendrán los rasgos espectrales (bandas y anchos de banda) mínimos que permiten su identificación y se propondrá un espectrómetro multibanda. La fase final será demostrar que con las imágenes proporcionadas por dicho espectrómetro, y con el procesado adecuado, se cumplen los objetivos de detección fijados.

7.1. Teledetección de combustiones limitada por el nivel de fondo

Un problema específico para el que vamos a proponer un sistema multiespectral es la detección de un objeto (blanco), cuya característica principal, a efectos espectrales, es la de ser una combustión de hidrocarburos. Esta detección se llevará a cabo en ambientes exteriores, con un alto nivel de fondo, producido por la reflexión solar, especular o difusa. En esta situación, el factor que limita la detección fundamentalmente no es la baja señal sino el alto nivel de fondo y su desorden o variabilidad espacio-temporal (*clutter*). Es el caso de objetos de pequeñas dimensiones cuya señal IR es del orden de la del fondo (*background*) y queda fácilmente enmascarada por el *clutter*. En esta sección se va a estudiar la optimización de la detección desde el punto de vista exclusivamente espectral. Está por tanto fuera de nuestro propósito el análisis espacial y temporal de los fenómenos y procesados a ellos asociados.

En casos como el que nos ocupa, detección óptima no significa por lo general el uso de un gran número de bandas, pues esto obliga a procesar una gran cantidad de información en gran parte redundante, debido a la alta correlación que habitualmente existe entre ellas. Este laborioso procesado puede llevar implícito un retardo en la toma de decisiones, inadmisibles en sistemas de alarma temprana. Optimizar la detección significa determinar el número de bandas mínimo necesario, sus longitudes de onda de centrado y anchos de banda, adecuados para cumplir el objetivo de detección propuesto. Para situaciones con baja probabilidad de aparición del suceso a detectar (conatos de incendio, alarma ante amenazas, ...) se suele seguir el criterio de Neyman-Pearson, que consiste en elegir el algoritmo que para una *Probabilidad de Falsa Alarma* (PFA) dada (en general baja), proporciona la mayor *Probabilidad de Detección* (PDet) posible [Wilmot 93].

Obviamente, para determinar las bandas que se utilizarán en el sistema multiespectral será necesaria una caracterización espectral de la escena. Pero mientras que los objetos a detectar (blancos), como son las combustiones, están generalmente muy bien caracterizados espectralmente, la situación para los fondos es completamente diferente. Los fondos, considerados como un número cuasi infinito de elementos radiantes, cambiantes aleatoriamente en el espacio y en el tiempo, sólo pueden ser definidos por magnitudes estadísticas que en los casos más simples (asimilables a

distribuciones gaussianas), son el valor medio de su radiancia y sus dispersiones espacial y temporal, definidas éstas por las desviaciones estándar.

Así, mientras para la caracterización de la imagen espectral del blanco será suficiente con unas pocas medidas, sin necesidad de resolución espacial (con la posibilidad de utilizar incluso radiancias espectrales a partir de simulaciones), para el fondo es imprescindible una caracterización que permita calcular el valor medio de radiancia y su dispersión, para cada instante de tiempo, en cada banda y para los diferentes fondos posibles, o para una parte estadísticamente significativa. Para este fin, el espectrómetro de imagen hiperespectral será una potente herramienta que permitirá adquirir con alta resolución para descender posteriormente a una propuesta de espectrómetro óptimo con menos bandas. Además, esta instrumentación permite el estudio simultáneo del escenario donde se llevará a cabo la detección y del blanco o fenómeno a detectar en él, a diferencia de los estudios clásicos de espectrorradiometría donde generalmente, y debido a la falta de resolución espacial, es imposible estudiar los fondos de alto desorden.

En el trabajo que exponemos aquí se ha propuesto una metodología innovadora que permite aminorar el impacto de la gran variabilidad de fondos en el análisis. Consiste en la generación de “imágenes sintéticas” de alta resolución espacial y espectral a partir de las imágenes reales, adquiridas en campo y separadamente, de fondos y blancos, mediante el espectrómetro de alta resolución disponible (sección 3.4).

El resultado de la investigación propone un espectrómetro de imagen trabajando en 3 bandas estrechas. En el estudio de separabilidad blanco-fondo, y para realizar una primera selección de las bandas dado que trabajamos con imágenes hiperespectrales, se han tenido en cuenta las características espectrales (*features*) del blanco sobre el fondo y se han comparado con las del fondo sin blanco. Este es uno de los métodos habitualmente empleado en espectrometría de imagen de alta resolución, para eliminar bandas cuya información está muy correlacionada [Schott 97]. También se suele emplear el *análisis de componente principales* (apartado 4.2.6) sobre todas las bandas disponibles, pero con este método se podría perder información sutil, aunque importante para realizar la detección [Schott 97]. En nuestro método, este análisis de componente principales se realiza después de la selección inicial de bandas y se ha repetido para tríos de bandas diferentes en las que se observaban rasgos característicos (tanto del blanco como del fondo) que podrían *a priori* facilitar la detección. A partir de éstas, se define un *algoritmo de detección* y se calcula la PDet, para una PFA fijada previamente,

proponiéndose un espectrómetro con las 3 bandas estrechas cuyos resultados hayan sido los mejores. Finalmente se estudia el comportamiento del mismo con la pérdida de resolución espectral, es decir, para el ensanchamiento de las bandas, comparándose los resultados obtenidos.

En resumen, la metodología propuesta para la optimización de la detección en estos casos es la siguiente:

- Caracterización hiperspectral de los escenarios IR y del blanco o fenómeno a detectar en la situación real donde se producirá la detección. Si esto no es posible, se deberá:
 - Caracterizar por separado el escenario (fondo) donde se va a realizar la detección y el blanco a detectar.
 - Generar imágenes hiperspectrales sintéticas a partir de las anteriores, mediante la inserción adecuada (espacial, espectral y radiométrica) del blanco sobre los fondos.
- Preselección de diferentes bandas en base al estudio de las características espectrales (*features*) blanco-fondo de estas imágenes hiperspectrales sintéticas. Las bandas preseleccionadas se agrupan en conjuntos de tres.
- Realización de un análisis de componentes principales para cada uno de estos tríos.
- Aplicación del algoritmo de detección a las componentes principales de cada trío de bandas.
- Selección del trío de bandas que maximiza la probabilidad de detección para una probabilidad de falsa alarma máxima previamente fijada.

7.1.1. Caracterización hiperspectral IR del escenario y del blanco

Hasta ahora, excepto en las imágenes tomadas desde helicóptero y en exteriores (túnel de fuego y campus universitario), habíamos optimizado la detección en situaciones de laboratorio donde la radiación de fondo del escenario era controlable, o al menos reproducible. Sin embargo, en el caso que nos ocupa, y como ocurre generalmente en teledetección IR, la radiación del fondo tiene una gran variabilidad siendo determinante su estudio para la detección del fenómeno de que se trate.

El caso concreto que vamos a abordar consiste en la detección de un blanco pequeño a distancia en el horizonte, sobre un fondo marino. El blanco va a estar constituido por una combustión típica de hidrocarburos, de la que conocemos perfectamente su distribución espectral de radiancia, y que puede ser medida mediante espectrometría de alta resolución, técnicas FTIR o simplemente simulada con unos perfiles espectrales determinados, comunes por lo general a todas las combustiones.

La capacidad de detección va a venir limitada por el fondo. La elección de fondos marinos para este estudio proviene de la conveniencia de aplicar el método en un caso relativamente sencillo, porque los fondos marinos poseen la propiedad, comparados con los terrestres, de que su variabilidad espacial (*clutter*) es menor y más homogénea, ya que el emisor siempre será del mismo material y podremos suponer que estará a la misma temperatura. No obstante, a pesar de ser el fondo más sencillo, los aspectos relativos a la degradación por distancia serían similares a los de otros fondos. La dificultad práctica frente a los fondos terrestres proviene de la dependencia temporal del *clutter* marino, que no será objeto de nuestra investigación aquí.

Caracterización de fondos marinos

Se han estudiado diferentes fondos marinos donde la radiancia proveniente de diferentes regiones de la imagen varía notablemente en cuanto a su señal, e incluso en cuanto al *clutter* para cada longitud de onda, y también dentro de cada imagen (para una longitud de onda determinada). Tanto el nivel de señal, como el *clutter* dependen en gran medida de la posición del sol respecto de la línea de visión del sistema hiperespectral, por varias razones: en primer lugar, por los reflejos especulares y difusos que pueda introducir, y en segundo lugar, por la dispersión de la radiación solar en la atmósfera.

Las imágenes hiperespectrales en el infrarrojo medio del horizonte marino se han tomado en diferentes condiciones meteorológicas: nublado, soleado y con nubes y claros. La velocidad del viento y en consecuencia el oleaje eran pequeños y por tanto el *clutter* de dicha escena era relativamente bajo ($< 10\%$ de la señal del fondo). Finalmente se ha tomado como fondo representativo uno tomado a las 14:00 horas GMT y con el sistema de medida apuntando hacia el oeste. Se ha elegido este escenario debido a que presenta un nivel de señal de fondo elevado y variable a lo largo de la imagen y también zonas de *clutter* muy diferente debido a los reflejos solares difusos sobre las olas y a la dispersión de la radiación solar por la atmósfera. Esto puede comprobarse en la figura 7.1 donde se muestra una imagen del escenario utilizado

centrada en $3.84\ \mu\text{m}$ y una gráfica de la radiancia detectada (en unidades arbitrarias) para la línea señalada.

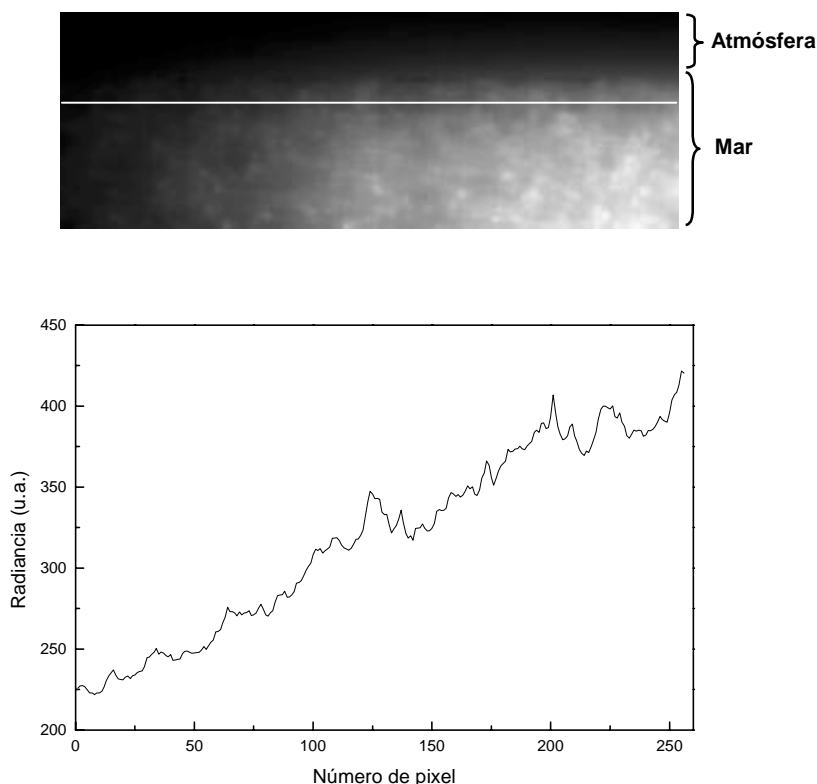


Figura 7.1. – Imagen de fondo marino, centrada en $3.84\ \mu\text{m}$, obtenida con el espectrómetro de imagen IR de alta resolución con un ancho de banda de $25\ \text{cm}^{-1}$. La gráfica muestra la radiancia en unidades arbitrarias, para la línea señalada en la imagen, en la que puede apreciarse su fuerte variación con la posición, y el *clutter* como el rizado de alta frecuencia espacial.

Caracterización espectral del blanco a detectar

Como se ha señalado anteriormente el blanco en este trabajo tiene un interés secundario, ya que no es necesario un blanco extenso o imagen como tal. Se utiliza como blanco (con un tamaño de un píxel) un espectro estándar promedio de un motor de combustión interna con una radiancia arbitraria con el fin de que, una vez insertado, nos proporcione señales del orden de las del fondo; de esa forma se simularán condiciones de detección límite. Los rasgos característicos de estos espectros corresponden básicamente a las bandas de emisión del CO_2 separadas por la absorción atmosférica (*spikes* azul y rojo), monóxido de carbono, hidrocarburos inquemados y agua.

En la figura 7.2 se muestra una espectro de la radiancia espectral entre 3 y $5\ \mu\text{m}$ típica de estos gases, en la que se puede apreciar la emisión de CO y los *spikes* rojo y azul del CO_2 . Este espectro se ha obtenido a corta distancia y posteriormente ha sido corregido por la transmitancia atmosférica para una distancia de 10 km. La

transmitancia atmosférica se ha calculado con MODTRAN para alta resolución (1 cm^{-1}), utilizando el modelo *Midlatitud Summer* para las condiciones ambientales del fondo marino estudiado [Ontar 96], y posteriormente se ha degradado hasta la resolución propia del IMSS (25 cm^{-1}).

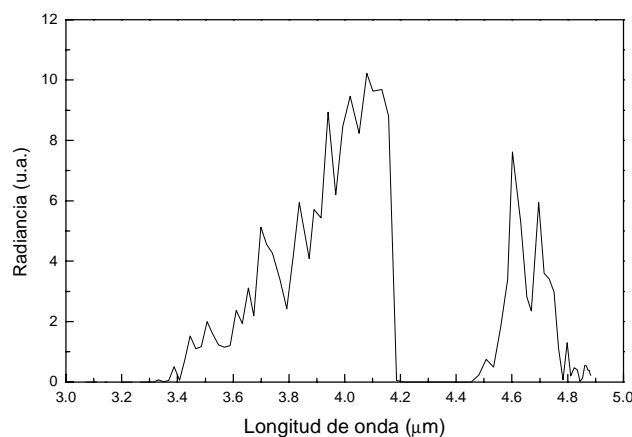


Figura 7.2. – Distribución espectral típica de la radiancia de un blanco compuesto por los gases típicos en la combustión de hidrocarburos, corregida por la transmitancia atmosférica para 10 km mediante MODTRAN.

7.1.2. Generación de imágenes sintéticas

En el problema que nos ocupa tenemos un escenario abierto, con reflejos solares, y un blanco a detectar cuya radiancia total es del orden o inferior a la emitida, dispersada y reflejada por el mar. Dada la imposibilidad de disponer de ese tipo de imágenes y menos aún en todas las condiciones de fondo requeridas, se ha procedido a la generación de imágenes hiperespectrales sintéticas a partir de las imágenes de los fondos y los espectros de blancos descritos anteriormente.

Una de las cuestiones más importantes a la hora de conseguir resultados cuantitativos fiables es el modo de inserción de los blancos sobre las imágenes de fondos. En efecto, si se dispone de un espectro de radiancia de un blanco obtenido a corta distancia o en laboratorio y se quiere simular sobre la imagen sintética su aspecto a largas distancias, es imprescindible hacer las correcciones debidas a la absorción y emisión de la atmósfera, y también a la dispersión solar que ésta produce en ambientes marinos, ya que ello va a tener gran influencia en la distribución espectral, como se ha señalado en el capítulo 6. En nuestro caso (figura 7.2), se supondrá una columna atmosférica de 10 km a efectos no tanto de obtener radiancia absoluta como de obtener

los rasgos espectrales relativos característicos del blanco. Se ha comprobado que cualquiera que sea el tipo de combustión (de hidrocarburos) sus características más determinantes a grandes distancias no es tanto el tipo de combustión como el efecto de la atmósfera (emisión y transmisión).

Otra de las cuestiones clave en la simulación es la pérdida de resolución espacial debido a la distancia. Como se indicó al principio de la sección el blanco debería ser de pequeñas dimensiones, por lo que se ha optado por elegir como tamaño un píxel.

7.1.3. Determinación de las longitudes de onda y anchos de banda adecuados

Una forma de reducir el número de bandas habitualmente utilizada en teledetección cuando se trabaja con imágenes hiperespectrales es el estudio de las características espectrales del objeto en el escenario a detectar [Schott 97]. En nuestro caso, estudiaremos fundamentalmente los perfiles espectrales del fondo, y en particular, de zonas del fondo próximas al blanco. Este estudio será realizado sobre las imágenes hiperespectrales sintéticas generadas en 105 bandas, entre 3 y 5 μm , para la máxima resolución del sistema, 25 cm^{-1} . Dada la variabilidad del nivel de señal y *clutter* de la imagen de fondo marino utilizado (figura 7.1) se han insertado sobre el mar 100 blancos de forma aleatoria en las diferentes regiones de la imagen.

En la figura 7.3 se muestra una imagen sintética de alta resolución centrada en 3.84 μm , donde no se pueden apreciar los blancos debido a su baja radiancia y dimensiones, por lo que se ha señalado con un cuadrado rojo la posición de tres de ellos en tres zonas de la imagen claramente diferenciadas, en cuanto a la radiancia detectada (figura 7.1); también se muestran los perfiles espectrales para los blancos insertados (rojo), y fondo marino en la zona superior (verde) e inferior (azul) a cada uno de ellos, para cada una de las tres regiones en que se podría dividir la imagen en cuanto a su nivel de señal. En estas gráficas se puede observar la variabilidad de la señal del fondo con la longitud de onda para cada una de las regiones donde se ha insertado blanco. También se pueden apreciar las características espectrales del blanco (que constituyen su firma espectral respecto del fondo) y que se deben a las bandas de emisión características de los gases de combustión: el *spike* rojo del CO_2 en 4.61 μm ; el *spike* azul en 4.16 μm ; y el CO en 4.7 μm . En principio, éstas podrían ser las tres bandas estrechas con las que optimizar la detección. Sin embargo, para elegir las bandas no basta sólo con estudiar

las que se corresponden con las características espectrales del blanco. Tras haber realizado un *análisis de componentes principales* para diferentes conjuntos de 3 bandas, se ha llegado a la conclusión de que la detección se optimiza al utilizar dos bandas con características espectrales del blanco: centradas en $4.61\ \mu\text{m}$ (*spike* rojo del CO_2) y en $4.16\ \mu\text{m}$ (*spike* azul); y una tercera, característica del fondo en $4.19\ \mu\text{m}$ (en la zona de absorción del CO_2 atmosférico), señaladas en la figura 7.3.

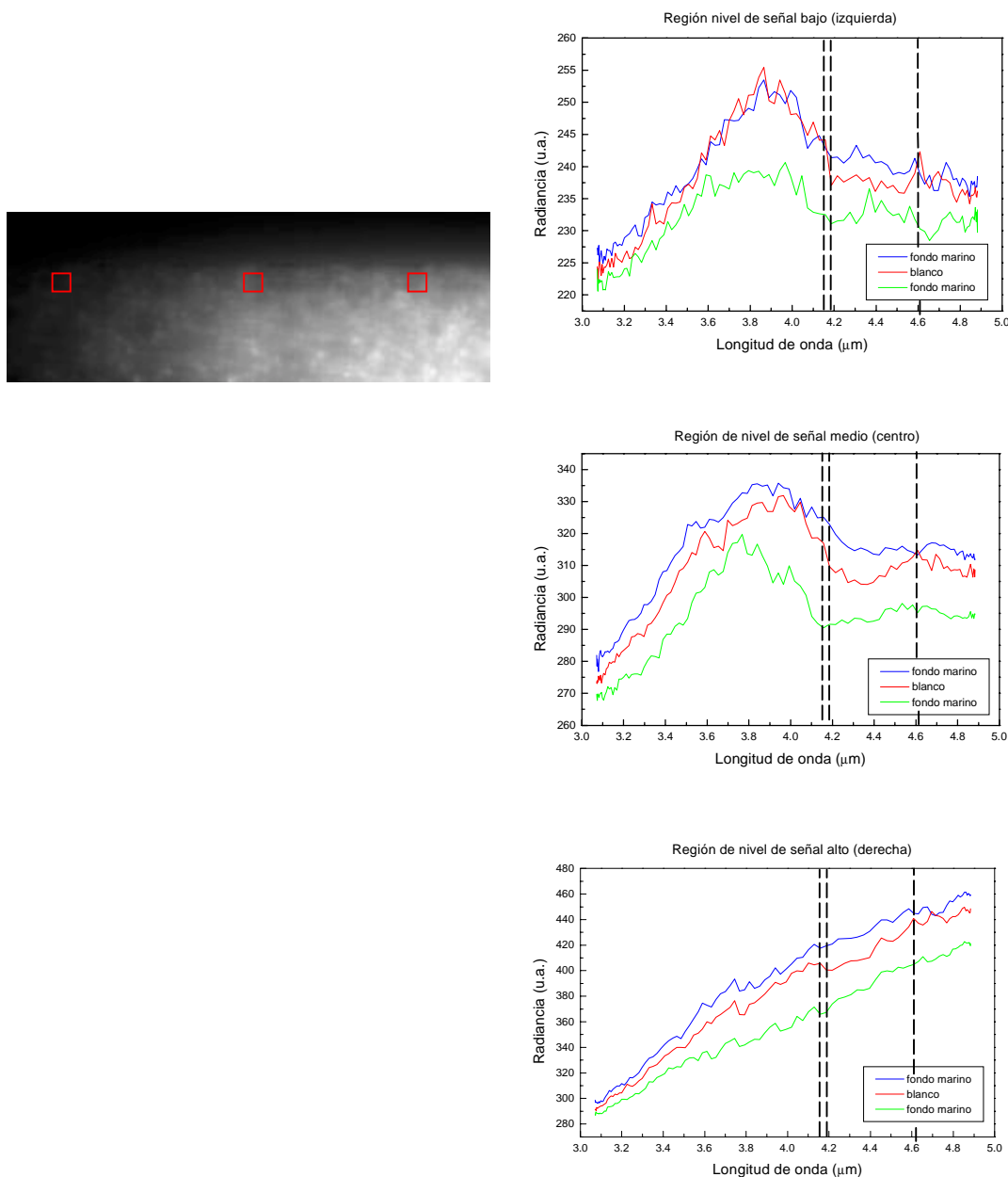


Figura 7.3. – Espectros obtenidos de las imágenes sintéticas de alta resolución ($25\ \text{cm}^{-1}$) para tres de los blancos insertados en diferentes zonas (se señala su posición sobre una de las imágenes mediante cuadrados, a la izquierda), y para las zonas de fondo marino próximas a los mismos, inferior (azul) y superior (verde). También se señalan las longitudes de ondas seleccionadas para optimizar la detección.

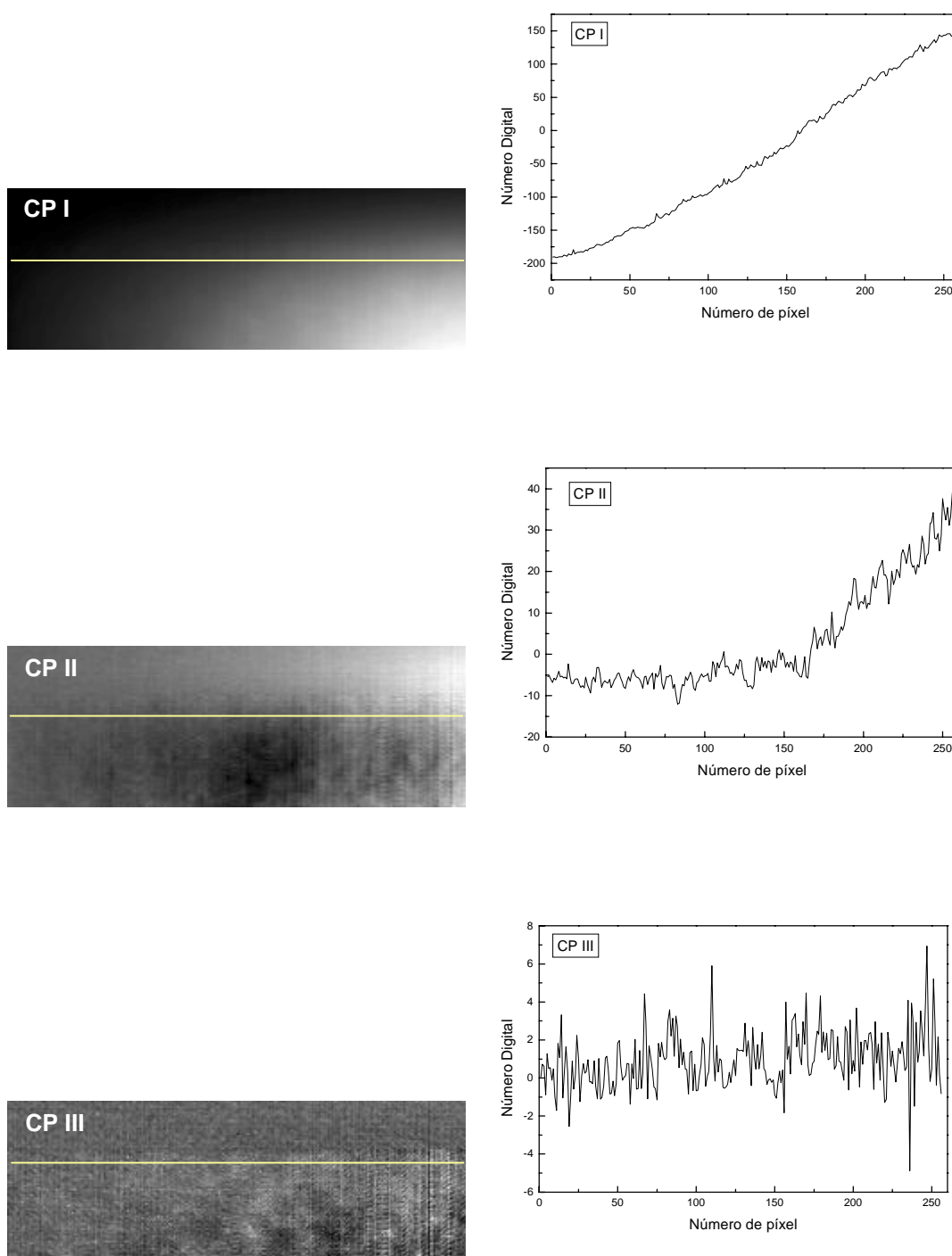


Figura 7.4. – Imágenes de las tres componentes principales obtenidas del análisis realizado a las tres bandas seleccionadas para la optimización de la detección, junto con los perfiles horizontales en una línea donde se han insertado 4 blancos.

El resultado de este análisis de componentes principales, para las tres bandas señaladas, son tres nuevas imágenes combinación lineal de las originales (apartado 2.4.6). La primera componente, CP I, contiene prácticamente toda la información correlacionada de la escena proporcionada por las tres bandas y referente a su nivel

medio de señal, mientras que la CP II y CP III, contienen el resto de información; en la que se engloba el ruido y otras características espacio-espectrales como son los propios blancos. Las imágenes obtenidas del análisis de componentes principales de estas tres bandas se muestran en la figura 7.4, junto con los perfiles horizontales para una línea donde aparecen cuatro de los blancos insertados. El análisis visual de las imágenes CP no permite localizar los blancos. Sin embargo, si analizamos el número digital de la línea de la imagen que se representa en las gráficas, se puede advertir la presencia de los cuatro blancos (gráfica de CP III) insertados en esa línea, pero también la de numerosas falsas alarmas sobre todo en la zona de alto fondo.

No obstante, se ha observado que dada la gran variación del fondo en este escenario en cuanto a su nivel de señal (patente en las gráficas de la figura 7.1 y también en la correspondiente a la imagen de la CP I, figura 7.4), para optimizar la detección es conveniente dividir el escenario en dos regiones en función de este nivel. Para ello utilizaremos la CP I, y consideraremos que la zona de alta señal será aquella en la que $ND_{CPI} > 0$ y de baja señal cuando $ND_{CPI} < 0$ (donde se engloba la de nivel medio y bajo). Hecha esta separación, para detectar los blancos basta con hacer una umbralización en la CP III, ya que como se puede ver en la gráfica correspondiente a esta imagen (figura 7.4) el ND_{CPIII} para un píxel donde se ha insertado un blanco es bastante más elevado que para el resto de la imagen, excepto para las falsas alarmas.

Para comprobar la robustez de este procedimiento como algoritmo de detección generaremos curvas ROC donde se representa la probabilidad de detección en función de la probabilidad de falsa alarma (figura 7.5) (apartado 4.3.1)[Wilmot 93][Provost 97]. Como era de esperar, la probabilidad de falsa alarma es más elevada cuando el nivel de señal del fondo también lo es, debido a la influencia de los reflejos y dispersión solares.

Como se puede comprobar, la metodología propuesta con sólo tres bandas en la región MIR permite detectar un blanco de pequeñas dimensiones (1x1 píxeles), que tiene una estructura espectral característica, sobre un fondo cuya señal es del mismo orden y cuyo *clutter* puede enmascarar la señal proveniente del blanco. Se observa que, para una PFA de 10^{-1} , la PDet que se alcanza para la región de alto fondo es del orden del 80 %, mientras que en la región de bajo fondo es mayor del 95 %.

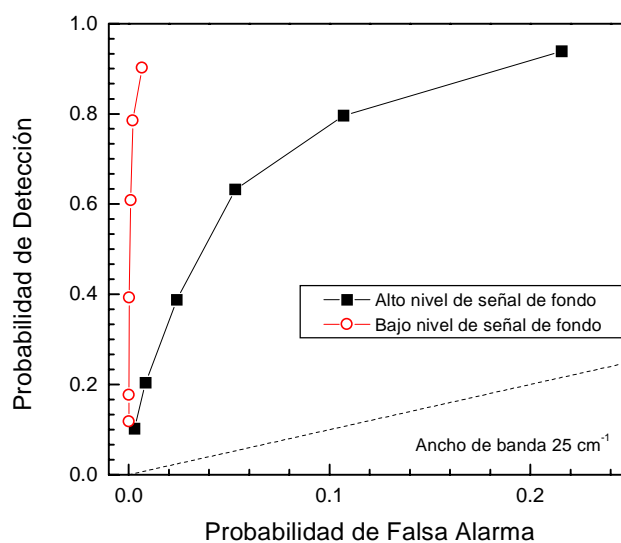


Figura 7.5. – Curvas ROC obtenidas aplicando el algoritmo de detección descrito a las imágenes procedentes del análisis de componentes principales realizado a las imágenes sintéticas seleccionadas en 4.61, 4.19 y 4.16 μm y cuyo ancho de banda es de 25 cm^{-1} (se ha indicado la diagonal para comparar).

Perdida de resolución espectral

Hasta ahora el problema de la detección en situaciones límite y para pequeñas dimensiones del blanco (1 píxel), se ha estudiado utilizando la máxima resolución espectral del espectrómetro de imagen disponible. A continuación se estudia la influencia de la resolución espectral en la detección y su optimización para el caso de bandas espectrales más anchas. Para ello, partiendo de las imágenes sintéticas generadas con resolución espectral de 25 cm^{-1} , se va a realizar una degradación espectral hasta obtener imágenes que simulen anchos de banda de 50 y 100 cm^{-1} . La degradación se ha hecho de manera que se simule la imagen que se obtendría si se hubiesen utilizados filtros con dichos anchos de banda, es decir, cuidando que se mantenga el *clutter* típico a pesar del promedio que se realiza en radiancias a partir de las imágenes originales.

La longitud de onda de centrado para la optimización de la detección con estos dos anchos de banda se ha establecido siguiendo la metodología propuesta, es decir, preseleccionando varias bandas con características espectrales del blanco y también del fondo. Sólo se han generado unas pocas bandas para cada nueva resolución (7 y 5 bandas respectivamente), en regiones espectrales donde ya sabemos que se encontrarán las características de interés. En la figura 7.6 se muestran los espectros que definen estas bandas preseleccionadas, para los mismos píxeles que las imágenes de alta resolución (figura 7.3). En ella se puede comprobar que la forma de los espectros varía

notablemente debido al menor número de bandas y a la pérdida de resolución espectral, pero aún es posible encontrar rasgos espectrales propios del blanco.

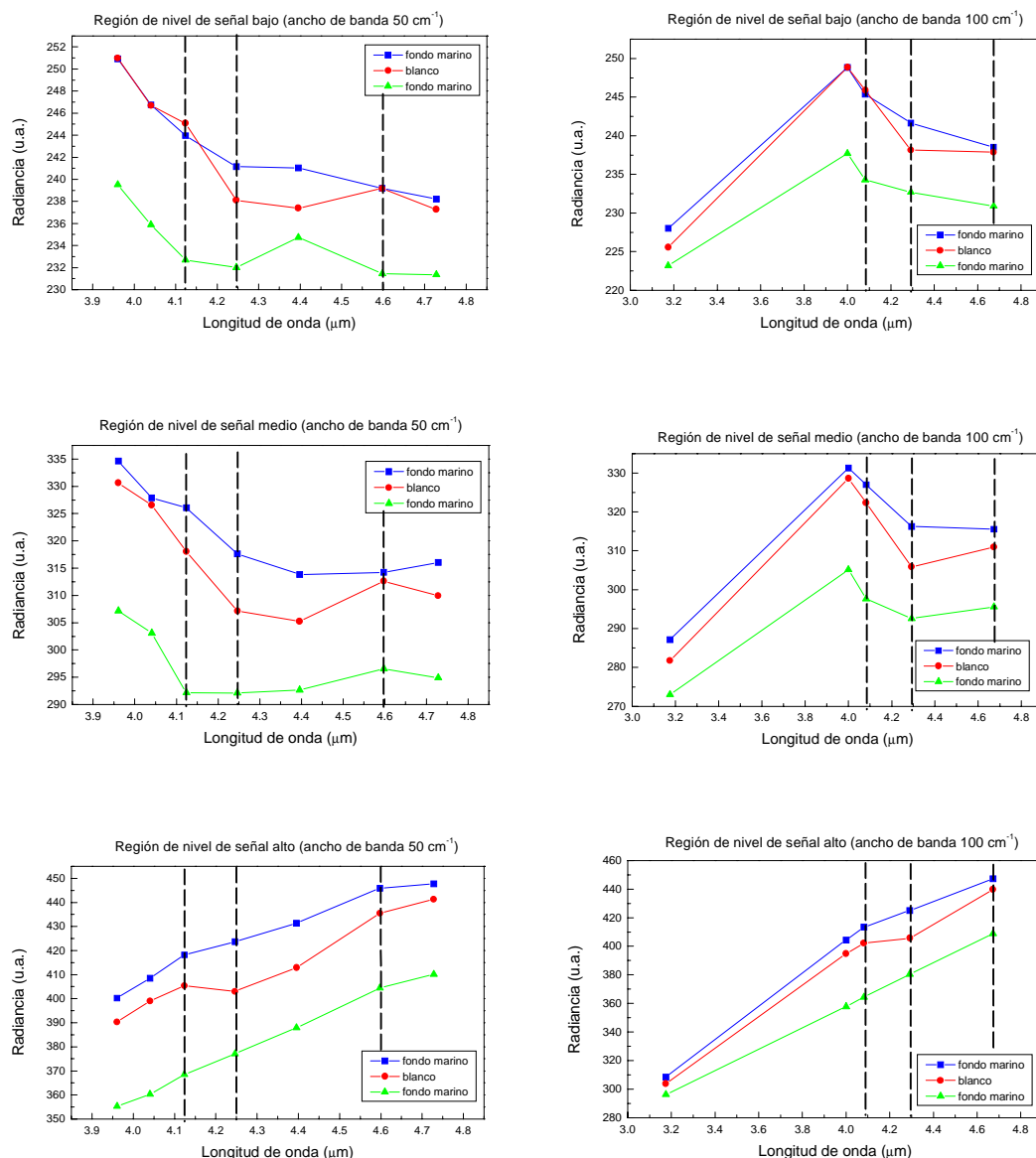


Figura 7.6. – Espectros de los píxeles estudiados en la imagen 7.3 obtenidos en este caso para las imágenes degradadas para un ancho de banda de 50 cm⁻¹ (7 bandas, izquierda) y de 100 cm⁻¹ (5 bandas, derecha). En las gráficas se mantiene el código de colores utilizado para la figura 7.3: rojo para los blancos; azul para la zona de fondo marino inferior, y verde para la superior. También se señalan las longitudes de onda seleccionadas para la optimización de la detección.

Estudiadas las características espectrales de las imágenes se ha procedido a realizar un análisis de componentes principales con diferentes grupos de 3 bandas, encontrándose que el centrado de las bandas que optimizan la detección es prácticamente el mismo que en el caso anterior. Los resultados obtenidos se muestran en

la tabla 7.1 (también se señalan en la figura 7.6), donde se indica la longitud de onda de centrado y la característica espectral de la emisión en cada caso.

Característica espectral	Longitud de onda de centrado ancho de banda 50 cm ⁻¹	Longitud de onda de centrado ancho de banda 100 cm ⁻¹
CO2 (<i>spike rojo</i>)	4.60 μm	4.67 μm
Fondo	4.40 μm	4.29 μm
CO2 (<i>spike azul</i>)	4.12 μm	4.08 μm

Tabla 7.1. – Longitud de onda de centrado utilizada para la optimización de la detección con anchos de banda de 50 y 100 cm⁻¹. El centrado varía ligeramente respecto al utilizado para el ancho de banda de 25 cm⁻¹ debido a que las nuevas bandas se han obtenido a partir del promedio de las de alta resolución.

Se han generado curvas ROC para estos nuevos anchos de banda variando la umbralización sobre la tercera componente principal en las dos regiones en que se ha dividido el escenario. Las gráficas de la figura 7.7 muestran el incremento notable de la probabilidad de falsa alarma con la pérdida de resolución espectral, sobre todo en la zona de baja señal de fondo.

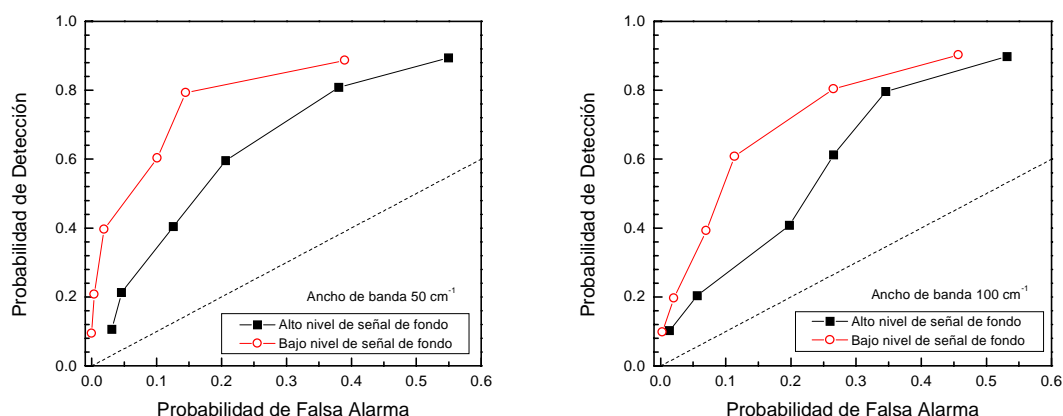


Figura 7.7. – Curvas ROC obtenidas para las imágenes de 50 (izquierda) y 100 (derecha) cm⁻¹ de ancho de banda utilizando la metodología propuesta con las imágenes centradas en las longitudes de onda indicadas en la tabla 7.1. En ellas se puede comprobar el incremento de la probabilidad de falsa alarma con el aumento del ancho de banda, sobre todo en la zona de baja señal donde influyen en menor cuantía los efectos solares (dispersión y reflexión).

También se han realizado cálculos para un ancho de banda mayor, 200 cm⁻¹, comprobándose que las curvas ROC se aproximan a la diagonal, por lo que se puede considerar que por procedimientos únicamente basados en el análisis espectral, la detección de estos blancos, siguiendo la metodología descrita en esta sección y en las

condiciones supuestas, tiene un límite de resolución espectral que está entorno a 150 cm^{-1} . Es evidente que otras condiciones que afectan a relación de radiancia del blanco frente al fondo, pueden cambiar esta conclusión hacia mayor o menor resolución exigible desde el punto de vista exclusivamente espectral.

En la tabla 7.2 y en la figura 7.8 se resumen los datos de las curvas ROC para comparar como afecta la pérdida de resolución espectral a la probabilidad de detección encontrada para una probabilidad de falsa alarma fijada, en cada una de las dos zonas en las que se ha dividido el escenario en cuanto a su nivel de fondo.

Ancho de banda	Probabilidad de falsa alarma	Probabilidad de detección	
		Alto nivel de fondo	Bajo nivel de fondo
25 cm^{-1}	10^{-1}	~ 80 %	> 95 %
50 cm^{-1}	10^{-1}	~ 30 %	~ 55 %
100 cm^{-1}	10^{-1}	~ 25 %	~ 45 %

Tabla 7.2. – Resumen de los resultados obtenidos en las curvas ROC, para los tres anchos de banda utilizados 25 , 50 y 100 cm^{-1} , en la propuesta para la optimización de la detección mediante espectrometría de imagen en el MIR, para situaciones límites de detección y fijada la probabilidad de falsa alarma en 10^{-1} .

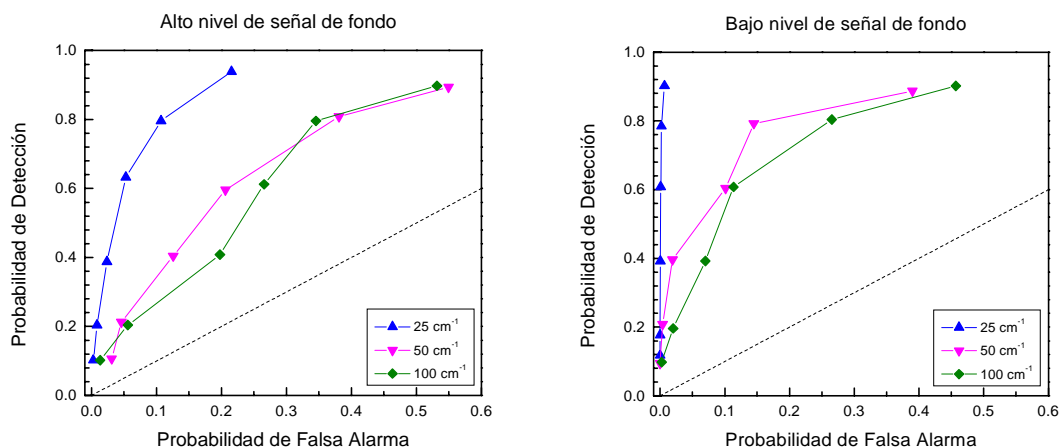


Figura 7.8. – Curvas ROC donde se resumen los resultados obtenidos siguiendo la metodología propuesta para la detección de blancos, de pequeño tamaño (1 píxel), a gran distancias y en las condiciones descritas, para los tres anchos de bandas señalados. Para mayor claridad se han agrupado en dos gráficas correspondientes a las zonas de nivel de fondo en las que se ha dividido el escenario en cuanto a nivel de fondo alto (izquierda) y bajo (derecha).

7.2. Medida de temperatura real de llamas

La determinación de la temperatura de llamas y más aún, su distribución espacial, constituye hoy en día, a pesar de la importancia estratégica que tienen las combustiones en nuestra vida actual, un problema no resuelto de difícil respuesta fuera del laboratorio [Robinson 91]. En esta sección se aborda este problema con los métodos de la termografía IR clásica y la espectrometría de imagen de alta resolución, para finalmente proponer un sistema multiespectral específico, relativamente simple, que puede proporcionar mapas de temperatura en tiempo real. Esta propuesta abre un gran número de posibles aplicaciones prácticas de interés en los campos medioambiental e industrial.

7.2.1. La medida de la temperatura termodinámica o real de llamas

Aunque existen muchas técnicas de medida de temperatura, determinar la temperatura del fuego sigue siendo una cuestión difícil. Comparado con los sólidos, el fuego presenta una estructura espacial y espectral muy compleja (figura 1.1). Su temperatura y composición no son uniformes en el espacio y generalmente tampoco en el tiempo. Además, la introducción de sondas en la llama generalmente causa una importante perturbación, que en algunos casos hace que la medida de la temperatura sea poco fiable.

Recientemente estas dificultades han sido superadas mediante una nueva generación de “diagnósticos de combustión” láser, como los basados en *scattering Raman* (Coherent Anti-Stokes Raman Scattering, CARS), y técnicas de *fluorescencia láser inducida* (Laser Induced Fluorescence, LIF), capaces de realizar sondeos de temperatura y análisis composicional de una manera no intrusiva y con una buena resolución espacial y temporal [Eckbreth 88]. El inconveniente principal de estas técnicas es que los equipos son muy caros y los montajes de laboratorio necesarios para la realización de las medidas muy complejos. Obtener un mapa de temperaturas en tiempo real y en ambientes reales es hoy imposible mediante esas técnicas.

Termopares

En aplicaciones medioambientales, tales como el estudio de los incendios forestales, la mayoría de los estudios de temperatura se realizan con termopares, instrumentos robustos, baratos y fáciles de usar, pero que presentan varios problemas importantes:

- Respuesta lenta: sólo dan medida de temperatura promediada en el tiempo.
- Medidas puntuales: para obtener la distribución espacial de temperaturas sería necesario colocar una malla de termopares.
- Perturbación de la medida: el principal problema se debe a que un termopar perturba el fuego, debido a que tiene una conductividad térmica y una capacidad calorífica no despreciables comparada con los gases calientes de la llama. Esto hace que la llama se apague (*flame quenching*) cerca del sensor provocando por tanto que la lectura de temperatura sea menor (figura 7.9).
- Se deben hacer correcciones del balance radiativo que usualmente no son bien conocidas.
- La temperatura leída depende del diámetro del termopar, porque la rapidez de respuesta, la capacidad calorífica y las correcciones radiativas están afectadas por el tamaño.

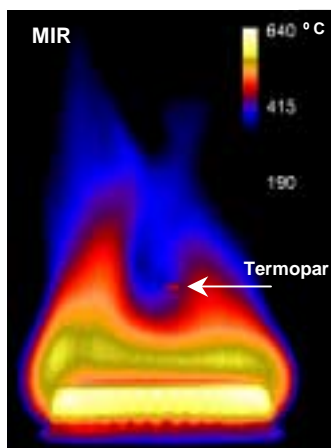


Figura 7.9. – Imagen MIR de una llama calibrada en temperatura de brillo donde se aprecia la perturbación introducida por un termopar (*flame quenching*).

Termografía clásica

En contraposición a los inconvenientes que presentan los termopares, la termografía infrarroja es una técnica de teledetección, y por tanto no intrusiva, capaz de realizar medidas prácticamente instantáneas (debido a la rapidez de respuesta) de una gran área, sin tener que desplegar una malla de sensores. Por estas razones es una técnica muy interesante para el estudio del fuego en campo. Sin embargo, a pesar de estas ventajas se

debe tener precaución al estudiar la imagen de una llama en el IR [den Breejen 98]. Como ya se ha visto en este trabajo, la emisividad de una llama depende fuertemente de la longitud de onda (figura 1.1), por lo que esta técnica nos proporciona una temperatura de brillo que puede diferir enormemente de la temperatura real (o “termodinámica”). Por otra parte, a diferencia de lo que ocurre en los cuerpos opacos, de los que habitualmente se ocupa la termografía, en una llama puede ser importante la radiación de fondo recibida a través suyo.

Estos problemas se pueden apreciar en el quemador de propano estudiado en capítulos anteriores (figura 6.5). En la figura 7.10 se pueden observar los perfiles verticales de temperatura de brillo obtenidos para esa llama en cada banda, frente a las temperaturas proporcionadas por otras técnicas: medida con un termopar y medida con el método de emisión-transmisión. Este método, que describimos a continuación, consideraremos que da la mejor aproximación a la temperatura real. Los valores pequeños y la ausencia de estructura para el perfil de la banda TIR, contrastan con el perfil obtenido para la imagen MIR. La temperatura del termopar es mucho más alta que cualquiera de las temperaturas de brillo, pero menor que la temperatura real medida a partir del método emisión-transmisión.

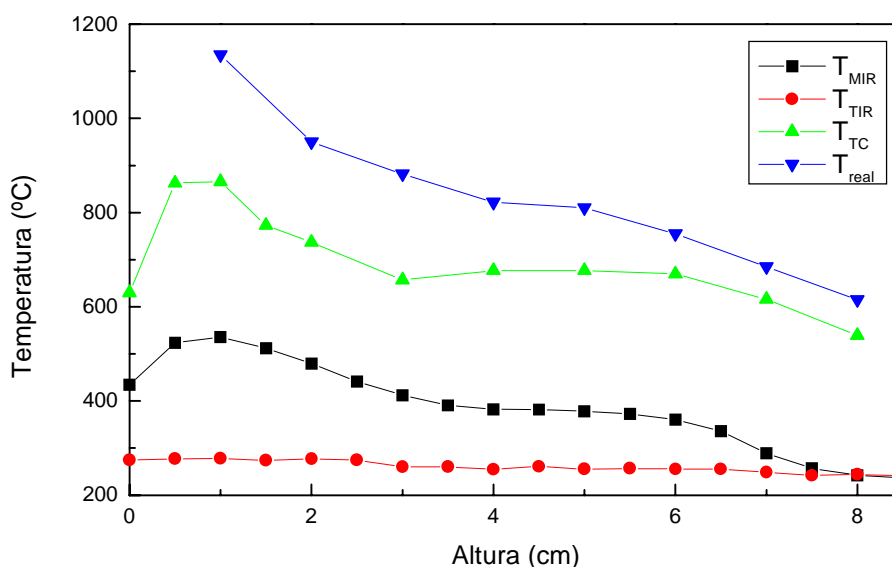


Figura 7.10. – Perfiles verticales de temperaturas de brillo MIR y TIR obtenidos para la llama de un quemador de propano doméstico. También se indican la temperatura obtenida por un termopar (TC) y la T_{real} calculada por el método de emisión-transmisión. El origen de alturas se ha tomado en la parte superior del quemador.

7.2.2. Método de emisión-transmisión por espectrometría FTIR

Los fundamentos del método se pueden encontrar en [Solomon 91]. Nuestro experimento con FTIR se ha realizado con el fin de verificar su extensión posterior a espectrometría de imagen. La idea básica parte de que en una llama la reflectividad es cero, y por tanto $(1 - \tau_f)$ será la absorbancia, α_f . Para el rango de temperaturas utilizado se puede asumir el equilibrio radiativo en llama [Lewis 87], de modo que $(1 - \tau_f)$ es la emisividad. Si realizamos medidas espectrales de la transmitancia, $\tau_f(\lambda)$, y de la radiancia de la llama $L_f(\lambda)$, podemos calcular una “radiancia normalizada” mediante la expresión:

$$L_n(\lambda) = \frac{L_f(\lambda)}{1 - \tau_f(\lambda)} \quad [7.1]$$

Con las hipótesis de reflectancia cero y equilibrio radiativo, el espectro de la radiancia normalizada $L_n(\lambda)$ debería comportarse como el de un cuerpo negro. La temperatura de la llama será la del cuerpo negro cuya radiancia se ajusta a la de la radiancia normalizada calculada. Por supuesto, la temperatura real no es espacialmente homogénea y el valor obtenido debe entenderse como un valor promedio a lo largo de la línea de visión.

Para aplicar este método, la radiancia de la llama se ha medido contra un fondo frío a temperatura ambiente obteniendo $L_f(\lambda)$. Para obtener la transmitancia de la llama se han realizado dos medidas adicionales contra un fondo caliente. La primera, sin llama, para obtener la radiancia del fondo caliente $L_b(\lambda)$, y la segunda midiendo la llama frente a ese mismo fondo para obtener $L_{bf}(\lambda)$. Es fácil demostrar que la transmitancia para una “llama delgada” (es decir, una llama cuyo espesor, si fuese ocupado por aire, tendría una transmitancia igual a la unidad) se puede obtener mediante la expresión:

$$\tau_f(\lambda) = \frac{L_{bf}(\lambda) - L_f(\lambda)}{L_b(\lambda)} \quad [7.2]$$

Las medidas de radiancias para la llama del quemador se realizaron mediante un espectrorradiómetro infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) calibrado, y que posee una resolución máxima de 0.5 cm^{-1} . Para realizar las medidas de $L_f(\lambda)$ y $L_{bf}(\lambda)$ a diferentes alturas, se situó una pantalla con un orificio de 1 cm de diámetro delante de la llama. La distancia del espectrorradiómetro a la llama fue de 4.45 m. Para el fondo caliente se utilizó un cuerpo negro a 570 °C . La configuración de medida se muestra en la figura 7.11. Los espectros $L_{bf}(\lambda)$, $L_f(\lambda)$ y $L_b(\lambda)$ obtenidos para un punto a una altura

de 1 cm sobre el quemador, en el rango de 4 a 5 μm se muestran en la figura 7.12 (izquierda), donde se observa la absorción del CO_2 atmosférico produciendo la separación de la emisión del CO_2 caliente en los *spikes* rojo y azul característicos. En la gráfica de la derecha de dicha figura, se muestra el cálculo de la transmitancia espectral de la llama $\tau_f(\lambda)$ mediante la expresión [7.2], frente a la transmitancia de la atmósfera para esa distancia donde se observa la absorción del CO_2 atmosférico.

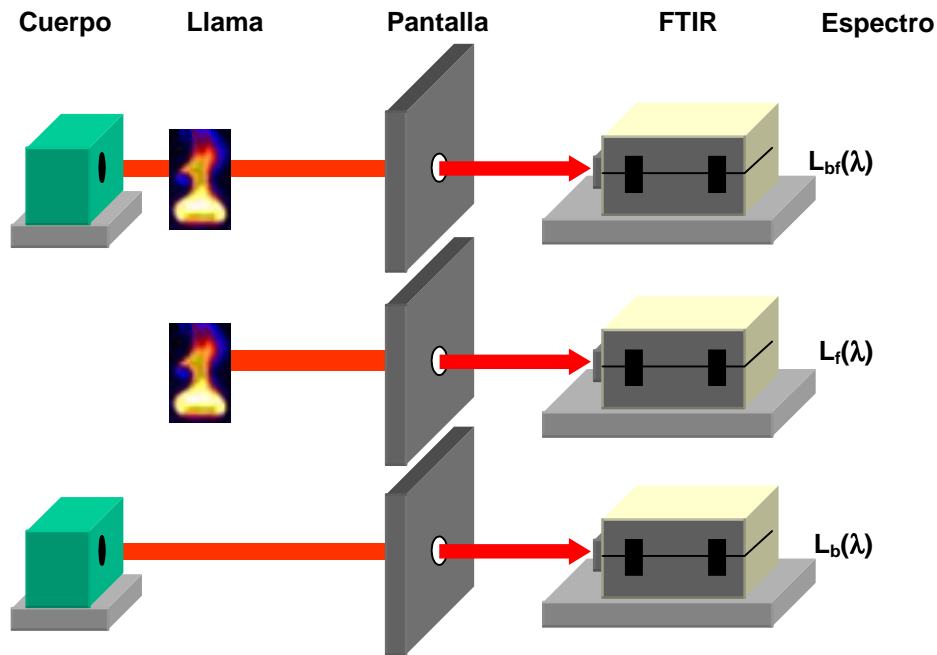


Figura 7.11. – Configuración de medida utilizada para calcular la transmitancia espectral de la llama mediante espectrorradiometría FTIR.

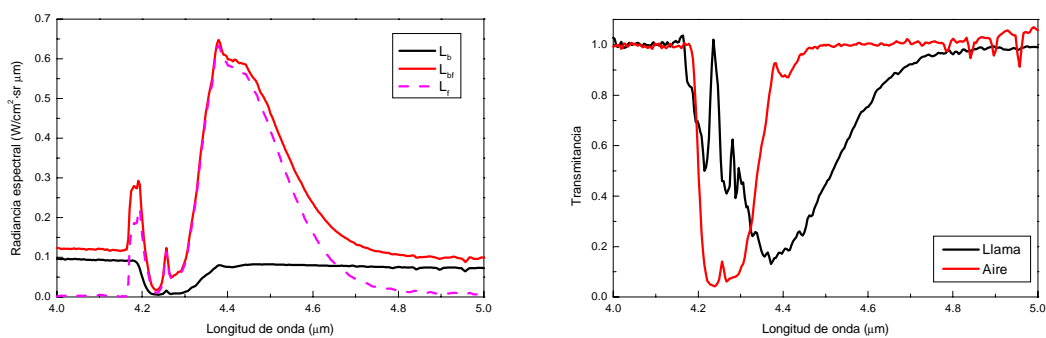


Figura 7.12. – Radiancia espectral obtenida con la configuración de medida de la figura 7.11 (izquierda) y gráfica del cálculo de la transmitancia de la llama frente a la transmitancia de la atmósfera para esa distancia (derecha).

Valores elevados de la transmitancia de la llama hacen que el denominador de la expresión [7.1] se haga pequeño, pero al mismo tiempo se corresponden con las

longitudes de onda donde la emisión de la llama es menor, por lo que el valor del numerador de [7.1] también se hace pequeño. Esto provoca que la radiancia normalizada $L_n(\lambda)$ venga afectada de un gran error fuera de las longitudes de onda de la banda de emisión de la llama [Aranda 00].

Los valores obtenidos de $L_n(\lambda)$ para las longitudes de onda donde absorbe el CO_2 atmosférico tampoco son fiables, porque todos los términos necesarios para calcular $\tau_f(\lambda)$ (ecuación [7.2]) tienen valores muy pequeños en esa región. Esto hace que la mejor zona para hacer el ajuste de la radiancia normalizada sea la región de longitudes de onda largas del *spike* rojo.

En la figura 7.13, se muestra la radiancia normalizada calculada con [7.1], para un punto a 1 cm sobre el quemador. Se observa cómo fuera del *spike* rojo los errores son muy grandes, pero en esa región se obtiene un buen ajuste para la emisión de un cuerpo negro a una temperatura de 1135 °C.

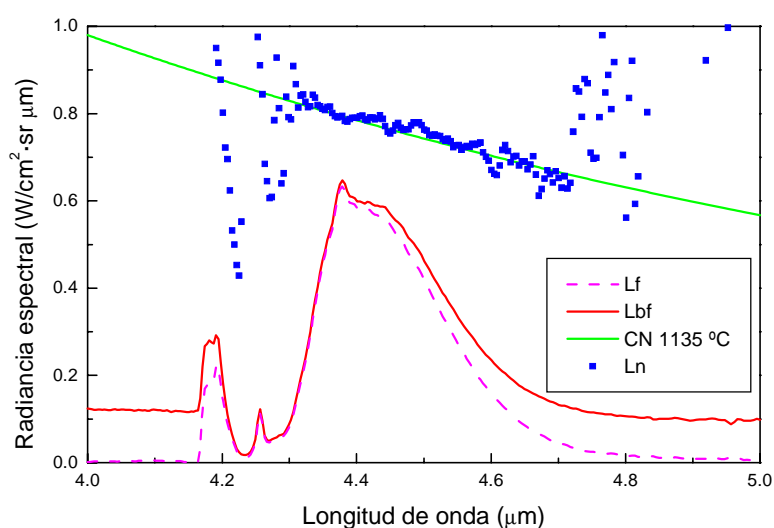


Figura 7.13. – Cálculo de la radiancia normalizada a partir de espectros de emisión experimentales y ajuste de la misma a la emisión de un cuerpo negro a 1135 °C.

El perfil vertical de temperatura obtenido mediante el método de emisión-transmisión se muestra en la figura 7.10. Comparando esta “temperatura real” de la llama con las temperaturas de brillo obtenidas podemos determinar una emisividad efectiva ϵ_{ef} . Los valores obtenidos para la banda MIR se muestran en la figura 7.14. Para una *llama limpia*, con cantidades despreciables de hollín y partículas, la emisividad efectiva en la región MIR es función principalmente de la cantidad de CO_2 , que es generalmente mayor en las zonas más caliente de la llama donde la reacción exotérmica

de la combustión genera más CO_2 . Sin embargo esta emisividad también depende de la geometría del quemador, del tipo de combustible, de la relación de mezclado combustible/oxígeno y en cierta medida de la distancia de la cámara a la llama.

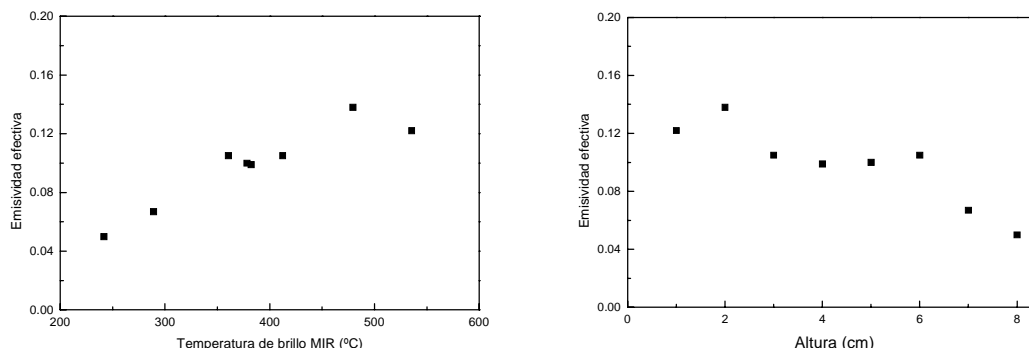


Figura 7.14. – Emisividad efectiva estimada en función de la temperatura de brillo de la banda MIR (izquierda) y en función de la altura de la llama estudiada (derecha).

Por lo tanto, aunque los resultados de la figura 7.14 pueden utilizarse como una guía para pasar de temperaturas de brillo a “temperaturas reales”, no puede extrapolarse para llamas muy diferentes a la estudiada. Podemos concluir que la termografía en una sola banda no es un método fiable para estimar la temperatura de llama *sin una previa calibración de la emisividad efectiva*, específica de cada llama.

7.2.3. Extensión del método de emisión-transmisión mediante espectrometría de imagen de alta resolución

Lo expuesto en el apartado anterior nos permite establecer un procedimiento para medir temperaturas reales en una llama mediante termografía IR, que se esquematiza en la figura 7.15. Se puede observar que es necesario realizar un gran número de medidas puntuales de la llama mediante espectrorradiometría IR, para calibrar su emisividad efectiva, y así obtener una gráfica como la de la figura 7.14, específica para la llama en cuestión. Posteriormente, esta emisividad se utilizará para calcular la “temperatura real” de la llama mediante una imagen de termografía IR.

Este método tiene dos importantes inconvenientes: requiere un laborioso calibrado previo usando el montaje de la figura 7.11, y sólo se obtienen emisividades efectivas para unos cuantos puntos que hay que extrapolar a los demás, lo que puede ser una importante fuente de error.

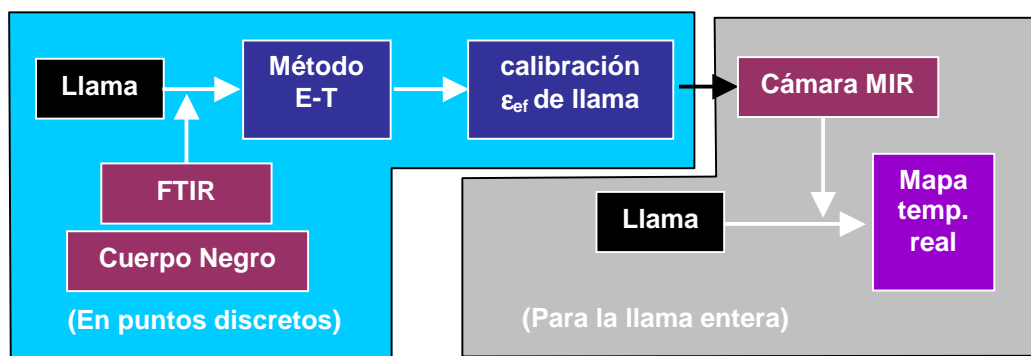


Figura 7.15. – Esquema del cálculo de temperatura de llamas mediante el método de emisión-transmisión y termografía en el infrarrojo medio.

Las técnicas de espectrometría de imagen de alta resolución en el infrarrojo medio son cuando menos prometedoras para simplificar este proceso, ya que con un sistema hiperspectral se obtienen imágenes en las cuales la información de cada píxel es el espectro de ese punto de la escena. Por lo tanto, no es necesario calcular la emisividad efectiva de la llama y es posible aplicar directamente el método de emisión-transmisión, mediante técnicas de procesado de imagen, a toda la llama. El esquema del procedimiento que sería necesario seguir se muestra en la figura 7.16.

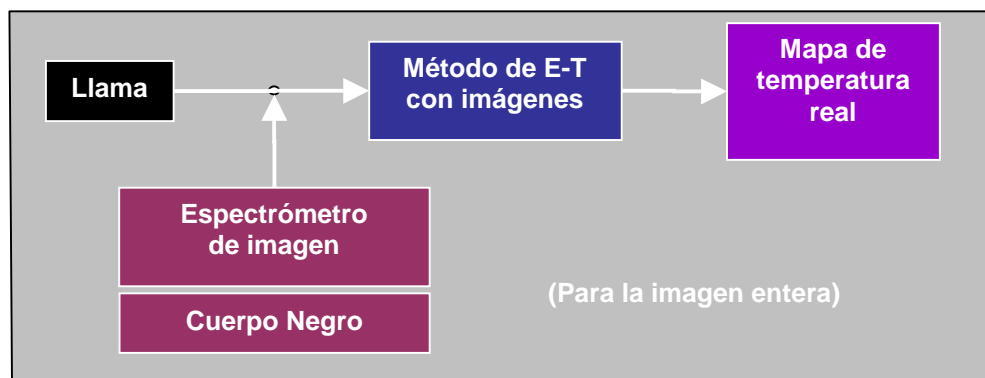


Figura 7.16. – Esquema del cálculo de temperatura de llamas mediante el método de emisión-transmisión mediante espectrometría de imagen de alta resolución en el infrarrojo medio.

Este procedimiento se ha aplicado al quemador objeto de estudio, con un montaje similar al de la figura 7.11, en el que se ha sustituido el FTIR por el espectrómetro de imagen de alta resolución, y por tanto, al disponer de resolución espacial no ha sido necesario utilizar la pantalla. El espectro obtenido en las mismas condiciones que los de la figura 7.13 se muestra en la figura 7.17. Se adquirieron 200 imágenes con una resolución de 25 cm^{-1} (la máxima posible del sistema), aunque luego fue degradada a 250 cm^{-1} para evitar así el flameo de la llama, ya que la medida se

realiza en 4 segundos. A pesar de tener una peor resolución que la utilizada con el FTIR (2 cm^{-1}), se observa el mismo conjunto de características, y aunque un buen ajuste de cuerpo negro para la radiancia normalizada no es posible en este caso, se puede estimar un rango de temperaturas para la llama entre $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Como dato cuantitativo este es un resultado muy aceptable teniendo en cuenta que son medidas preliminares y que el espectrómetro de alta resolución no está bien calibrado radiométricamente.

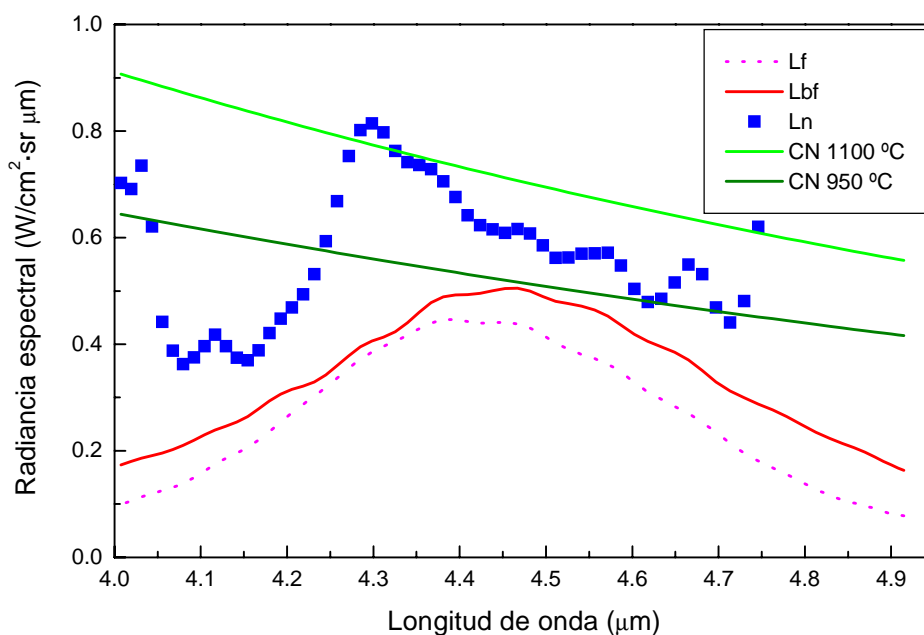


Figura 7.17. – Medida de la radiancia espectral por espectrometría de imagen IR de alta resolución (a 1 cm de altura sobre el quemador) de la llama en un fondo frío (L_f), llama con un fondo de cuerpo negro a alta temperatura (L_{bf}) y radiancia normalizada calculada (L_n). Para comparar se muestran los espectros de dos cuerpos negros a $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $950\text{ }^{\circ}\text{C}$.

7.2.4. Una propuesta para la determinación de temperaturas reales de llama mediante espectrometría de imagen multiespectral

En los apartados anteriores hemos explicado cómo las dificultades que encuentra la termografía infrarroja para determinar la temperatura real de llamas pueden superarse utilizando el método de emisión-transmisión (montaje de la figura 7.11) para proporcionar un calibrado de las emisividades efectivas. Este proceso de calibración, sin embargo, es muy laborioso, pues requiere tres medidas para cada punto. Además, la

extrapolación del calibrado a otros puntos de la llama, y especialmente a llamas distintas, puede introducir errores importantes.

La utilización de un espectrómetro de imagen de alta resolución evita estos problemas, pues al tratarse de un método de imagen bastan tres medidas para toda la escena sin que sean necesarias extrapolaciones a puntos no medidos. Subsisten, sin embargo, dos dificultades. En primer lugar, la determinación de la temperatura se basa en el ajuste de la radiancia normalizada por una función de cuerpo negro en todo un intervalo de longitudes de onda. Ese ajuste, en principio, debe hacerse manualmente para cada punto de la escena. En segundo lugar, las tres medidas necesarias no son simultáneas, pues deben hacerse en condiciones diferentes:

- sólo con la llama (A),
- con la llama y un cuerpo negro detrás (B), y
- con el cuerpo negro sólo (C).

Esta no simultaneidad es contraria al concepto de espectrometría de imagen, y puede introducir errores muy importantes, hasta el punto de invalidar el método, si la llama no es completamente estacionaria, como ocurre en la mayoría de las aplicaciones fuera del laboratorio.

En este apartado se propone un método que, basado en la experiencia de medida de temperaturas de llamas descrita en los apartados anteriores, promete superar estos inconvenientes, usando un sistema multiespectral en el IR medio.

Nuestra propuesta parte de sustituir el cuerpo negro del método emisión-transmisión por una rejilla caliente (es suficiente con que se comporte como un cuerpo gris de emisividad conocida). Ésta proporciona regiones alternativas próximas con y sin cuerpo negro detrás y por tanto, la imagen multiespectral adquirida tendrá puntos en los cuales detrás hay un cuerpo negro caliente y puntos muy próximos en los que detrás hay un cuerpo frío. Se obtendrían así en cada región los valores A y B. Obviamente la resolución del mapa estará limitada por las dimensiones del entramado de la rejilla, en vez de por la resolución espacial del sistema, pero si el gradiente de temperaturas dentro de la llama no es muy grande se puede suponer que no habrá diferencias notables entre la temperatura delante del sólido y del vano de la rejilla. Como se ha visto en apartados anteriores, la única región espectral que proporciona información significativa sobre la emisión de la llama en el método de emisión-transmisión es el *spike* rojo, de modo que no es necesario medir en todo el espectro. Bastaría para las medidas A y B utilizar tres bandas centradas en 4.40, 4.45 y 4.60 μm respectivamente. Para obtener los valores C

correspondientes a la radiancia del cuerpo negro, nuestra propuesta es utilizar las longitudes de onda en las que la llama es transparente. A este fin pueden utilizarse dos bandas estrechas centradas en 4.95 y 4 μm . La radiancia en estas bandas puede atribuirse exclusivamente al cuerpo negro. De este modo, bastarían cinco medidas cuasi simultáneas para aplicar el método de emisión-transmisión. La resolución espectral puede lograrse utilizando filtros estándar 2 % ABMT (Ancho de Banda a Mitad de Transmisión) montados en una rueda portafiltros girando delante de una cámara MIR.

7.3. Identificación y visualización de gases en una combustión

Como un último ejemplo de las posibilidades de los sistemas multiespectrales, vamos a mencionar los trabajos realizados sobre mezclas de gases. En este caso el interés es múltiple. Por un lado, científico, ya que los gases, además de presentar líneas o bandas discretas no presentan una superficie que enmascare las propiedades ópticas del objeto, por lo que el análisis espectral se puede hacer de una forma más inteligible y pura. Por otro lado, las mezclas de gases son un elemento de especial interés por sus aplicaciones a un gran número de sectores industriales y ambientales: control de emisiones de gases, estabilidad de la llama, y en particular todas aquéllas relacionadas con procesos de combustión, tanto en los aspectos de detección como de análisis de gases componentes y de investigación básica. Por último, los gases presentan el aliciente de estar hasta ahora menos estudiados desde el punto de vista de la teledetección desde satélite que los sólidos o líquidos. Sin embargo, la puesta en marcha de misiones específicas dedicadas a la detección de incendios (BIRD, FUEGO, FOCUS) o a la observación y estudio de la Tierra (genéricamente denominadas *earthwatch*), incluyendo la detección de gases de efecto invernadero y la medida de emisiones contaminantes ha puesto en un primer plano la teledetección de gases desde satélite.

En este contexto, una *tercera propuesta* de un espectrómetro de imagen, en este caso en tres bandas espectrales, está dedicada a analizar la estructura de las llamas basándose en la separación de sus gases componentes. Como se ha señalado, el análisis de gases mediante espectrometría IR aporta una gran cantidad de información, no sólo

con fines prácticos, sino también para profundizar en el conocimiento básico de un fenómeno tan complicado como la combustión.

La propuesta concreta tiene por objeto identificar y localizar espacialmente tres gases de gran importancia en una combustión de hidrocarburos, como son el CO_2 , el CO y los hidrocarburos (HC). Para ello y después de un análisis espectral, se han seleccionado tres longitudes de onda y anchos de banda específicos que optimizan la separación de los tres gases en un ambiente de combustión. A partir de tres imágenes centradas en las longitudes de onda de emisión de estos gases, se ha generado un imagen en falso color (RGB) que sintetiza la información cualitativa sobre su distribución espacial (figura 7.18). El interés del método propuesto estriba en que sienta las bases para el estudio cuantitativo de la composición y temperatura de la llama, si se aplica en conjunción con la propuesta del método de emisión-transmisión discutida en la sección anterior, dado que el conocimiento de la temperatura de la llama permitiría determinar, al menos con cierta aproximación, las concentraciones de gases que producirán las emisiones medidas.

Para realizar este estudio se ha elegido la llama de un mechero de gasolina donde la combustión se realiza con exceso de combustible y gran número de partículas provenientes de la mecha. Las imágenes hiperespectrales adquiridas nos permiten, una vez corregistradas, obtener un espectro de cualquier punto de la imagen. Estudiando los espectros para los diversos píxeles de la escena es posible detectar la presencia de gases por sus bandas de emisión características. Para cada gas, reviste especial interés la imagen correspondiente a la longitud de onda de su banda de emisión, pues permitirá localizarlo espacialmente con un contraste óptimo. Las longitudes de onda seleccionadas han sido: $4.72\ \mu\text{m}$ para el CO ; $4.44\ \mu\text{m}$ para el CO_2 ; y $3.40\ \mu\text{m}$ para los hidrocarburos. En la figura 7.18 (arriba) pueden verse las imágenes de la llama del encendedor en las longitudes de onda seleccionadas, y la localización espacial de cada uno de los gases: el CO en el centro de la llama donde parece existir una menor concentración de oxígeno al haber sido consumido; los HC en la parte superior de la chimenea del encendedor y también en el centro de la llama, probablemente debido a la menor concentración de oxígeno que impide su combustión; y el CO_2 distribuido en toda la llama. Para visualizar los tres gases simultáneamente y comparar sus posiciones relativas se ha generado una imagen RGB, en la que en rojo se ha elegido la imagen del CO , en verde la de los HC y en azul el CO_2 , que se muestra junto a una imagen en visible de dicha llama, donde se puede apreciar la estabilidad de la misma.

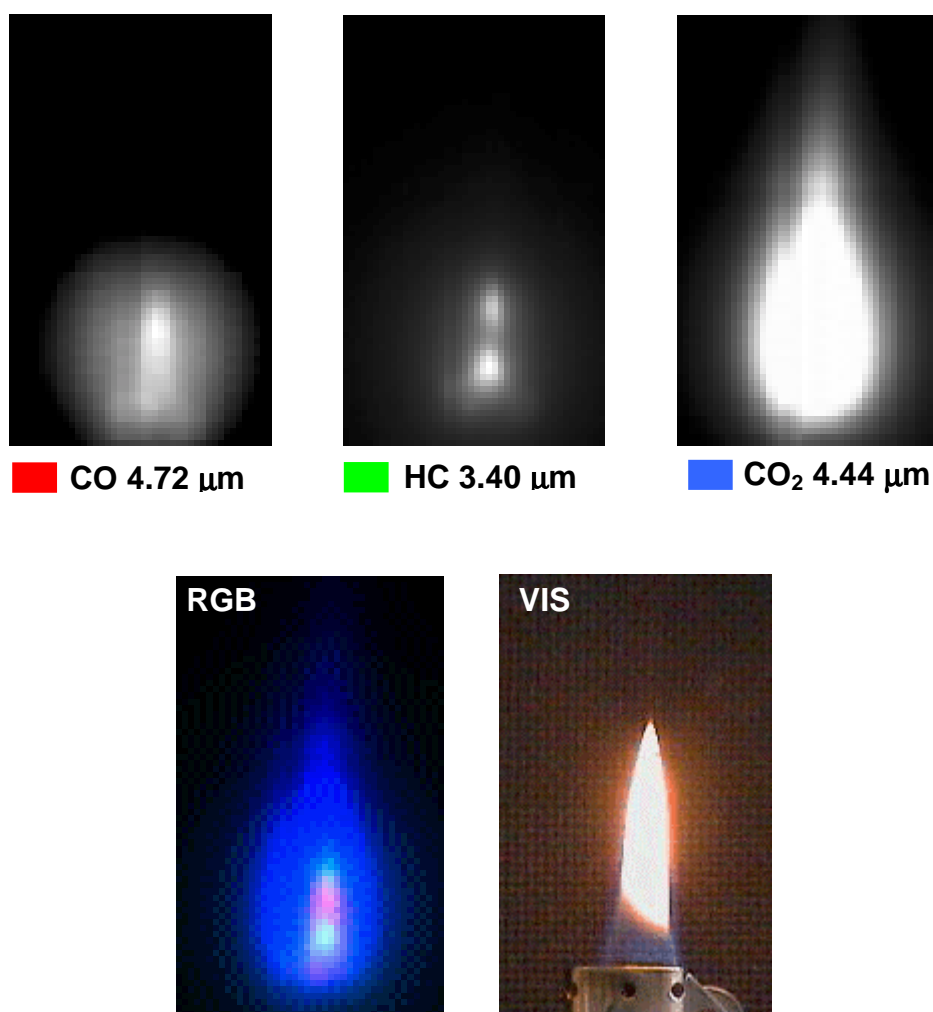


Figura 7.18. – Arriba: imágenes de tres gases producto de la combustión de la llama de un encendedor de gasolina en las longitudes de onda características de emisión de cada uno de ellos. Abajo: imagen RGB generada a partir de las anteriores (izquierda), donde se puede ver simultáneamente la distribución espacial de los tres gases y donde el color nos indica la concentración relativa de cada uno ellos. También se muestra una imagen en visible de dicha llama (derecha).

En conclusión, el análisis espectral y espacial proporcionado por el espectrómetro de imagen de alta resolución nos ha permitido seleccionar las longitudes de onda adecuadas para visualizar tres gases en una combustión de hidrocarburos: CO₂, CO e hidrocarburos inquemados. Esta técnica, en conjunción con la referente a la medida de temperatura de llama señalada en el apartado anterior, sienta las bases para poder medir concentraciones de gases en combustiones y en otras aplicaciones de interés industrial y medioambiental que caen fuera de los límites de esta memoria.

Capítulo 8

Conclusiones y líneas futuras

Finalmente, en este capítulo se resumen las conclusiones, aportaciones y las nuevas líneas abiertas tras la realización del trabajo que se recoge en esta memoria.

Conclusiones

- El presente trabajo ha contribuido a la investigación de nuevas técnicas y métodos en el campo de la espectrometría de imagen en el IR, encaminadas a la optimización de la teledetección de fenómenos con una marcada estructura espectral.
- En particular, son destacables sus aportaciones al estudio de las combustiones y a la detección de incendios forestales, aún siendo sus conclusiones y metodología de uso general.

Para el desarrollo de las aportaciones anteriores,

- Se ha definido, diseñado, realizado y calibrado un sistema que permite la adquisición digital de imágenes en tiempo real, simultáneas en las bandas MIR y TIR, calibradas radiométricamente y susceptibles de co-registración. Se trata por tanto de un *espectrómetro de imagen biespectral en el IR*, del que cabe destacar las siguientes características:
 - Basado en dos cámaras estándar en los intervalos espectrales MIR y TIR.
 - Calibrado en un amplio rango dinámico (equivalente a casi cinco órdenes de magnitud de radiancia).
 - Capacidad para teledetección aerotransportada y posibilidad de adaptación a cualquier plataforma.

- Posibilidad de ser implantado con facilidad en otros centros o laboratorios.
- Posibilidad de incorporar capacidad de procesado en tiempo real.
- Se ha desarrollado una metodología propia para clasificación y detección de incendios basada en las propiedades espectrales de llamas y combustiones:
 - Se han propuesto diferentes algoritmos que disminuyen la tasa de falsas alarmas, como son las imágenes de índices de fuego intrabanda e interbanda, fácilmente obtenibles en tiempo real, facilitando así la detección precoz de incendios.
 - A partir de una adaptación novedosa de las técnicas de procesado propias de la teledetección desde satélite, se han propuesto y probado con éxito técnicas de clasificación del escenario para la separación llama-cuerpos calientes, aplicables a largas distancias, y que suponen una importante aportación para la aplicación de la detección IR a la lucha contra los incendios forestales. Estas técnicas son aplicables a la teledetección de otros fenómenos con estructura espectral.
- Finalmente, se ha estudiado la optimización de la detección mediante técnicas de procesado espectral de imagen a partir del análisis de escenarios realizado utilizando un espectrómetro hiperspectral en el IR medio, para caracterizar diferentes problemas. Como resultado de este estudio se han realizado diferentes propuestas de espectrómetros multibanda con el centrado y ancho banda optimizados para cada caso. Los casos estudiados han sido:
 - Teledetección de combustiones a gran distancia, limitada por un alto nivel de fondo y por las dimensiones del objeto a localizar.
 - Determinación de la distribución espacial de temperaturas reales en una combustión. Como consecuencia de este estudio, se ha propuesto una solución innovadora, basada en un espectrómetro de cinco bandas para operar a distancia, en tiempo real y en ambientes industriales.
 - Identificación y visualización de gases en una combustión, lo que sienta las bases para la determinación de la concentración de gases mediante espectrómetros de imagen relativamente simples.

Líneas futuras

Algunas las líneas de investigación y desarrollos futuros sugeridos por el trabajo expuesto en esta memoria son los siguientes:

- Modificación del sistema de adquisición del actual espectrómetro de imagen biespectral (MIR-TIR) para que proporcione imágenes de índice de fuego interbanda en tiempo real (ver conclusiones del capítulo 5).
- Realización de nuevos sistemas de imagen multiespectral, basados en una cámara que trabaje en el IR medio, y su aplicación a problemas específicos:
 - Sistema biespectral que proporcione imágenes de índice de fuego intrabanda en tiempo real (ver conclusiones del capítulo 5).
 - Sistema de imagen en tres bandas para teledetección de combustiones a largas distancias (ver sección 7.1).
 - Desarrollo de un método de medida de temperaturas reales de combustiones basado en un espectrómetro de imagen de cinco bandas (ver sección 7.2).
 - Identificación especies químicas y visualización de su distribución espacial en entornos de combustión mediante sistemas de imagen multiespectral. En conjunción con el método anterior para medida de temperaturas reales, obtención de medidas cuantitativas de la distribución espacial de concentraciones.
- Desarrollos y generalizaciones del concepto de *imagen de índice de fuego*:
 - Definición de imágenes de índices “a medida” que optimicen la separabilidad de clases específicas. Este desarrollo puede tener importancia con vistas a extender la aplicación de métodos biespectrales a ámbitos diferentes de la teledetección de incendios, como puede ser el análisis no destructivo.
 - Estudio de índices adaptables a la escena, que podrían estar basados en imágenes de componentes principales en lugar de las imágenes en las bandas originales.
- Refinamiento del método de degradación espacial y radiométrica desarrollado en el apartado 6.3.2, incluyendo un modelo completo de la atmósfera. Estas mejoras permitirían realizar simulaciones a distancias mayores, equivalentes a las de observación desde satélite, lo que tiene interés para la validación de los datos obtenidos por satélites de observación de incendios, ya operativos (BIRD)

o próximos a su lanzamiento (FUEGO). Esta validación se pudo hacer más precisa, mediante la utilización de filtros específicos en el espectrómetro biespectral construido, con el mismo ancho de banda y centrado espectral que los canales empleados por dichos satélites.

Apéndice A

Tarjetas de adquisición de imágenes

A.1. Data Translation DT 3152

La tarjeta de adquisición de imágenes (*frame grabber*) analógicas, DT 3152 de Data Translation Inc. [DT3152 98], es una de las primeras para trabajar en ordenadores con arquitectura de bus PCI (novedosa a mediados de los 90) operando como *Bus Master*, es decir tomando el control del bus PCI del ordenador para la gestión de las imágenes adquiridas y su direccionamiento a memoria.

Especificaciones	DT 3152
Entradas de Vídeo	CCIR (50 Hz)/ RS – 170 (60 Hz)
	Variable Scan
	Asíncrono
Entradas	4 entradas monocromas para vídeo entrelazado o no entrelazado (seleccionables por software)
Rango de entrada	Desde 0. – 0.06 V hasta 0 – 3.04 (programable)
Ganancia	Desde 0.5 hasta 16 (programable)
Offset	± 1.07 V (programable)
Resolución	256 Niveles de gris (8 bits)
Tamaño máximo de imagen	4 Mbytes
Píxel ratio	0 – 20 MHz
Trigger externo	TTL
Selección de sincronismo	
Detección de sincronismo	
Píxel Clcok externo	200 mV (pico a pico mínimo) 0 – 20 MHz
Píxel Clock interno	1 kHz – 20 MHz (programable)
Píxel jitter	± 4.0 ns (máximo)
LUT	256 x 8
Memoria	No tiene, utiliza la RAM del PC
Velocidad de transferencia de vídeo	Hasta 45 Mbytes por segundo

Tabla A.1. – Características principales de la tarjeta de adquisición de imágenes DT 3152.

La combinación de la arquitectura *Bus Master* y el bus PCI del ordenador permite la visualización en tiempo real de las imágenes adquiridas por esta tarjeta en el monitor del ordenador, mientras pueden ser almacenadas imágenes consecutivas en la RAM del ordenador, evitando así el encarecimiento que supone la incorporación de RAM en este tipo de tarjetas.

Es una tarjeta de alta precisión que permite adquirir imágenes analógicas procedentes de vídeo compuesto monocromo con el estándar europeo, CCIR, y el americano RS – 170, y también imágenes variable scan, es decir procedentes de cámaras de barrido en las que se accede a la señal de vídeo del monodetector o detector lineal y a los sincronismos horizontal y vertical y tiempo de reloj del sistema, *pixel clock*. Las características principales de esta tarjeta se resumen en la tabla A.1 [DT 3152 98].

A.2. IM-PCI

La tarjeta de adquisición de imágenes digitales IM-PCI de Imaging Technology Inc. utilizada en este trabajo, también es *bus mastering* y para bus PCI, pero a diferencia de la anterior permite la adquisición de imágenes digitales con el protocolo de transferencia de datos RS – 422. La filosofía de la arquitectura de esta tarjeta es modular e incorpora memoria RAM para realizar procesado en la propia tarjeta. Consta de un modulo base en el que se inserta el módulo de adquisición adecuado, en nuestro caso el AM-DIG 16 para adquirir imágenes de 12 bits vía RS – 422, y también puede incorporar diferentes módulos de procesado. Las características principales [IM-PCI 95] se muestran resumidas en la tabla A.2.

Especificaciones	IM-PCI
Módulo de adquisición	AM-DIG 16 (16 bits)
Protocolo de entrada	RS – 422 (hasta 40 MHz)
Resolución	65536 (16 bits) Niveles de gris
Memoria de Imagen	2 Mbytes en 2 frames A01 1MB y A02 1 MB
Visualización	Monitor del ordenador
	Monitor VGA adicional
Trigger externo	TTL
LUT	Programable (hasta 16 bits)

Tabla A.2. – Características principales de la tarjeta de adquisición IM-PCI AM-DIG 16.

A.3. Road Runner

La tarjeta de adquisición de imágenes digitales Road Runner de BitFlow, es una tarjeta de altas prestaciones que permite la adquisición de imágenes procedentes de la salida digital de una cámara [Road Runner 96]. Está basada también en la arquitectura PCI de los ordenadores y es *bus mastering*. Su gestión del acceso directo a memoria (DMA) permite la transferencia directa de las imágenes a la memoria del sistema de una forma muy rápida y eficiente, aprovechando de esta forma la capacidad de procesamiento de los ordenadores actuales. Existen varios modelos cuyo puerto de entrada admite imágenes digitales desde 8 a 32 bits en grupos de 8 bits vía RS – 422. Las tarjetas utilizadas en este trabajo han sido las dotadas con puertos de entrada de 16 bits, modelo RUN-PCI-12, sus especificaciones se resumen en la tabla A.3 [website 11].

Especificaciones	ROAD RUNNER RUN-PCI-12
Módulo de adquisición	16 bits Multitap (o 2 de 8 bits)
Protocolo de entrada	RS – 422 (hasta 40 MHz)
Arquitectura	DMA Bus master
Adquisición	Directamente en la memoria del PC (sin usar CPU)
Tamaño de imagen	512 k x 32 k
Visualización	Monitor del ordenador
Otras señales de entrada	Trigger
	Pixel clock
	Line enable
	Frame enable

Tabla A.3. – Características principales de la tarjeta de adquisición ROAD RUNNER RUN-PCI-12.

Apéndice B

Sistemas de alimentación

B.1. Convertidor DC/AC APS INT 400

La alimentación de los equipos que componen el sistema de adquisición para medidas de tierra se realiza utilizando baterías de automóvil de 95 Ah para generar corriente continua a una tensión de 12 V. Esta corriente se transforma a corriente alterna de 220 V y 50 Hz mediante el convertidor APS INT 400 para suministrar la potencia necesaria a dicho sistema. Las características principales de este convertidor DC/AC se resumen en la tabla B.1.

Especificaciones	APS INT 400
Potencia nominal de salida	400 W
Potencia de pico de salida	800 W
Tensión DC de entrada	12 V
Entrada AC Tensión/Frecuencia	230 VAC, 50 ó 60 Hz ajustables
Corriente DC a plena carga	42 A
Salida AC Tensión/Frecuencia	230 VAC, 50 ó 60 Hz ajustables
Frecuencia de salida regulada	± 0.5 Hz
Peso	7.1 kg
Dimensiones (largo x ancho x alto)	250 x 170 x 175 mm

Tabla B.1. – Características principales del convertidor DC/AC APS INT 400.

B.2. Generador de gasolina HONDA G100

En las medidas de tierra también se utilizó un generador de gasolina Honda modelo G100 para proporcionar corriente alterna a 220 V y 50 Hz. La potencia máxima nominal de dicho generador es de 900 W. Generalmente en las medidas de tierra se utilizó el generador de gasolina y como sistema de alimentación de seguridad se utilizaba el convertidor anterior conectado a una batería de automóvil para prever posibles fallos en

el generador de gasolina que pudiese provocar un fallo de alimentación y afectar a los equipos o a la propia medida. Las características de este generador se muestran en la tabla B.2.

Especificaciones	Honda G100
Tipo de motor	4-tiempos, válvula lateral, 1 cilindro
Cilindrada	97 cm ³
Calibre x carrera	52 x 46 mm
Potencia máxima	1.9 kW/4200 rpm
Par máximo de torsión	0.46 kg-m/3000 rpm
Sistema de enfriamiento	Aire forzado
Sistema de encendido	Magneto transistorizado
Peso en seco	8.7 kg
Dimensiones (largo x ancho x alto)	275 x 270 x 345 mm

Tabla B.2. – Características principales del generador Honda modelo G100.

B.3. Convertidor DC/AC CP 600

El sistema de alimentación empleado para suministrar la potencia necesaria al sistema de adquisición embarcado en el helicóptero, consiste en un convertidor DC/AC que se conecta a una toma de la batería del helicóptero de 24 V para suministrar corriente alterna de 220 V y 50 Hz. Las características principales de este convertidor DC/AC se resumen en la tabla B.3.

Especificaciones	CP 600
Potencia nominal de salida	600 W
Sobrecarga admitida (5 s)	1000 W
Tensión DC de entrada	24 – 28 V
Tensión de salida	220 V AC ($\pm 7\%$)
Frecuencia de salida	50 Hz ($\pm 2\%$)
Peso	15.7 kg
Dimensiones (largo x ancho x alto)	430 x 205 x 175 mm

Tabla B.3. – Características principales del convertidor CP 600.

Apéndice C

Sistemas de amortiguación

C.1. Amortiguador V1B 1114 02

Para el aislamiento de vibraciones del sistema óptico embarcado en el helicóptero primeramente se probó el amortiguador modelo V1B 1114 02. Este amortiguador está construido sobre un muelle y en cuyo interior existe un cojín de malla metálica para absorber las vibraciones. Las características de este amortiguador se resumen en la tabla C.1[*website* 18].

Especificaciones	V1B 1114 02
Frecuencia de resonancia axial	7 – 9 Hz
Frecuencia de resonancia radial	7 – 9 Hz
Carga estática	7.5 – 13.5 kg

Tabla C.1. – Características principales del amortiguador V1B 1114 02.

Este amortiguador absorbía correctamente las vibraciones verticales pero se deformaba excesivamente en sentido lateral, por lo que se buscó otro tipo de amortiguador.

C.2. Amortiguador E1FH 2507 01

Este amortiguador fue probado debido a sus prestaciones de aislamiento multidireccional de vibraciones ofreciendo un alto amortiguamiento, debido principalmente a su eficiencia visco-elástica, que permiten un buen amortiguamiento y una vuelta muy rápida a la posición de equilibrio. Están diseñados para soportar carga en compresión. Constan de un resorte y un pistón trabajando en un aceite de silicona de elevada viscosidad encapsulados en una membrana elastomérica y fijada a una carcasa

[website 18]. Su fijación se realiza mediante 4 taladros en la base y un orificio roscado en la parte superior.

Las aplicaciones donde se suele utilizar este tipo de dispositivos son en la protección de equipos electrónicos, instrumentación de medida y navegación, así como paneles de instrumentación grabadores de datos, etc, instalados en vehículos de tierra, aviones, helicópteros, barcos y submarinos. Sus principales características se resumen en la tabla C.2.

Especificaciones	E1FH 2507 02
Máxima amplitud sinusoidal de entrada a la frecuencia de resonancia	± 2.5 mm
Frecuencia de resonancia axial a máxima amplitud de entrada	6 – 10 Hz
Factor de amplificación en resonancia	≤ 2.5
Carga estática axial	5 – 8 kg
Temperatura de utilización	- 54 °C a +150 °C

Tabla C.2. – Principales características del amortiguador E1FH 2507 01.

C.3. Amortiguador 7002 LA

Este amortiguador está constituido por una carcasa y una base en AG3 tratado, una campana superior de acero inoxidable, un muelle y un cojín metálico inoxidable como elemento resiliente. Su fijación se realiza mediante 4 taladros en la base y un orificio roscado en la parte superior.

Especificaciones	7002 LA
Máxima amplitud sinusoidal de entrada a la frecuencia de resonancia	± 0.8 mm
Frecuencia de resonancia axial	7 – 10 Hz
Frecuencia de resonancia radial	4.5 – 6 Hz
Factor de amplificación en resonancia	> 4
Carga estática axial	4.5 – 9.0 kg
Temperatura de utilización	- 70 °C a +300 °C
Carrera disponible en choque	axial: ± 6 mm radial: ± 5 mm

Tabla C.3. – Principales características del amortiguador 7002 LA.

Su frecuencia propia axial comprendida entre 7 y 10 Hz y su tope de limitación permiten utilizar el amortiguador para la protección de equipos informáticos o electrónicos, aparatos de navegación e instrumentos de a bordo [*website* 18]. Las características técnicas más importantes se resumen en la tabla C.3.

Apéndice D

Glosario

Array. – Matriz de detectores, lineal o rectangular.

Background. – Radiación de fondo en un escenario IR.

Bad píxel. – Término utilizado para referirse a los píxeles de una imagen digital que tienen un valor anómalo, debido a una mala respuesta o a una ausencia de respuesta del correspondiente detector del *array*.

Buffer. – Registros físicos de memoria que pueden ser reservados, por el sistema operativo o por una aplicación, para el almacenamiento temporal de información.

Bus Master. – Es una configuración especial empleada por algunas tarjetas de adquisición de imágenes para gestionar la transferencia de información en el bus principal del ordenador.

Chopper. – Rueda giratoria con aberturas que se utiliza para modular la luz que entra en un sistema electro-óptico.

Cluster. – Agrupación de puntos con características comunes (referido a un dispersograma).

Clutter. – Desorden o variabilidad espacio-temporal en la radiación de fondo de un escenario.

Correct rejection. – Denominación utilizada en teoría de la señal para referirse a cada uno de los píxeles clasificados dentro de una clase correctamente, es decir, a los verdaderos negativos.

DeskStation. – Sistema acoplable a un ordenador portátil para aumentar las capacidades del mismo en cuanto a instalación de tarjetas específicas, discos de almacenamiento, lectores y grabadores ópticos, etc.

Earthwatch. – Nombre genérico que reciben los satélites dedicados al estudio de la atmósfera y la superficie terrestre.

Enhancement. – Realce. Procesado de la imagen para la mejora o realce de la visualización de alguna de sus características.

Etching. – Proceso de ataque del substrato sobrante en la fabricación de dispositivos en microelectrónica.

False alarm. – Falsa alarma. Denominación utilizada en teoría de la señal para referirse a cada uno de los píxeles clasificados dentro de una clase incorrectamente, es decir, a los falsos positivos.

Features. – Término utilizado en teledetección para definir las características o rasgos (espectrales o de cualquier otro tipo) sobresalientes en una imagen cúbica.

Field of View (FOV). – Campo de visión total subtendido por un sistema formador de imagen.

Fill factor. – Factor de llenado. Relación existente en cada elemento detector (píxel) entre el área de detección y el área real de dicho elemento.

Flame quenching. – Fenómeno que consiste en el apagado de una llama por contacto con un metal (especialmente, una malla metálica).

Focal Plane Array (FPA). – Array de fotodetectores situado en el plano focal de la óptica. Pueden ser híbridos o monolíticos.

Frame grabber. – Tarjeta de adquisición de imágenes.

Frames per second (fps). – Imágenes por segundo. Unidad de medida de transferencia de imágenes.

Frame rate. – Es la velocidad de transferencia de imágenes en una cámara, se mide en fps.

Full focal plane array. – Es un FPA en el que los detectores están situados contiguamente y en el que el factor de llenado (*fill factor*) es del 100 %.

Gain. – Ganancia. Factor de amplificación de la señal eléctrica o de otro tipo.

Ground control points. – Puntos de control de tierra. Puntos de referencia que se definen en dos imágenes (en nuestro caso), o en una imagen y un mapa, para realizar una co-registración.

Ground truth. – “Verdad terreno”. Se denomina así en teledetección a una imagen, o porción de la misma, cuya información es conocida, bien porque se han realizado medidas de campo o por cualquier otro medio.

Hardware. – Son los dispositivos electrónicos que forman un equipo o que se pueden instalar en él. Generalmente, se refieren a los diferentes dispositivos electrónicos que forman un ordenador o que se instalan en él.

Hit. – Denominación utilizada en teoría de la señal para referirse a cada uno de los píxeles clasificados dentro de una clase correctamente, es decir, a los verdaderos positivos.

Indium bump hybridization. – Técnica de soldadura empleada en la fabricación de FPAs híbridos, para conectar el detector y el circuito electrónico de lectura.

Instantaneous Field of View (IFOV). – Campo de visión instantáneo. Campo de visión subtendido por cada uno de los elementos de un detector.

Look-up-table. – Es un dispositivo electrónico analógico (o función *software*) que asigna un nivel de gris o falso color para visualizar una imagen en función del nivel de señal (o número digital) entrante.

Maximum likelihood. – Método de clasificación por máxima verosimilitud.

Midlatitude Summer Atmospheric Model. – Modelo atmosférico típico para verano en climas templados.

Mini DV. – Estándar de grabación de audio y video visible digital utilizado por la cámara SONY DCR-TVR 20.

Miss. – Denominación utilizada en teoría de la señal para referirse a cada uno de los píxeles clasificados en la clase que no les corresponde, es decir, a los falsos negativos.

NightShot. – Denominación comercial del modo de visión nocturna mediante infrarrojo próximo (NIR) que utiliza la cámara SONY DCR-TVR 20.

Noise Equivalent Power (NEP). – Potencia equivalente de ruido. Potencia radiante que al incidir sobre un detector proporciona una señal eléctrica de igual valor que el ruido del detector.

Non-Destructive Testing (NDT). – Nombre que recibe el conjunto de técnicas de evaluación no destructiva.

Non-Uniformity Correction (NUC). – Tabla de corrección de no uniformidades que suelen incorporar las cámaras IR dotadas de FPA para almacenar los parámetros individuales de cada detector, a fin de que la respuesta del FPA sea uniforme ante un flujo radiante constante.

Offset. – Nivel de cero de una señal, generalmente eléctrica.

Pixel clock. – Es la frecuencia de reloj principal a partir de la cual se generan todas las necesarias para la lectura, formación y transferencia de imágenes en una cámara.

Pixel pitch. – Distancia entre centros de los píxeles de una *array* de detectores.

Píxel. – Del inglés *picture element*, designa cada uno de los elementos detectores de un *array*. También se utiliza este término para designar cada uno de los puntos que forman una imagen.

Scanning. – Barrido para la formación de la imagen necesario en cámaras dotadas de monodetectores o *arrays* lineales.

Scattering. – Dispersión de la radiación producida por la interacción de ésta con las partículas en suspensión o las moléculas del aire.

Shot noise. – Ruido de disparo. Es el ruido dominante en los fotodetectores, producido por la llegada aleatoria del flujo de portadores a la unión.

Signal-to-Noise Ratio (SNR). – Relación señal-ruido.

Software development kit (SDK). – Conjunto de librerías específicas de un determinado dispositivo o aplicación informática, para la programación de nuevas funciones de control o aplicaciones.

Software. – Es el conjunto o cada una de las aplicaciones informáticas instaladas o instalables en un ordenador.

Spikes. – Nombre que recibe cada uno de los picos que presenta la banda de emisión del CO₂ a una temperatura mayor que la ambiente, debido a la absorción del CO₂ atmosférico.

Strip mapper. – Denominación de la tecnología utilizada en el primer sistema de imagen IR embarcado, que utilizaba un solo detector y aprovechaba el movimiento del avión para realizar el barrido.

Stripping. – Error radiométrico que se produce en las imágenes del sensor MSS del Landsat debido a una respuesta no uniforme en una línea de detectores del mismo.

Variable Scan. – Denominación que reciben las tarjetas de adquisición de imágenes de una cámara cuando son capaces de adquirir las imágenes a partir del video analógico y los diferentes sincronismos de la cámara.

Website. – Dirección de internet que contiene información sobre un tema o producto concreto.

Bibliografía

- [Agema 92] *“Thermovision 480 Series. Operating Manual”*. AGEMA Infrared Systems AB. Publ. n. 556991. Danderyd, Sweden, 1992.
- [Aranda 99] Aranda, J.M.; de Castro, A.J.; Briz, S.; Meléndez, J. y López, F. *“Teledetección precoz de incendios forestales mediante sensores IR: Discriminación espectral de falsas alarmas”*, Teledetección. Avances y Aplicaciones. S. Castaño y A. Quintanilla eds. 271-274, AET, Albacete, 1999.
- [Aranda 00] Aranda, J.M.; Briz, S.; Meléndez, J.; de Castro, A.J and López, F. *“Flame analysis by IR thermography and IR hyperspectral imaging”*. Proceedings of Quantitative Infrared Thermography V - QIRT 2000, **pp** 337-342, 2000.
- [Aranda 01a] Aranda, J.M.; Briz, S.; de Castro, A.J; Meléndez, J. and López, F. *“Spectral infrared characterization of forest fire scenarios”*. Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems and Hydrology II M. Owe, G. D’Urso and E. Zilioli eds. SPIE Proc. **vol** 4171, **pp** 177-184, 2001.
- [Aranda 01b] Aranda, J.M.; Meléndez, J.; de Castro, A.J. and López, F. *“Forest fire studies by medium infrared and thermal infrared thermography”*. Proceedings of Thermosense XXIII, Rozlosnik, A.E. and Dinwiddie, R.B eds, SPIE Proc. **vol.** 4360, **pp.** 161 – 168, Orlando, 2001.
- [Aranda 01c] Aranda, J.M.; Meléndez, J.; de Castro, A.J.; Briz, S.; Ugarte, M.F. y López, F. *“Procesado biespectral de imágenes infrarrojas de incendios forestales correlacionadas espacio-temporalmente”*. Teledetección. Medio Ambiente y Cambio Global, Joan I. Rosell y José A. Martínez-Casanova eds. 243-247, AET, Lérida 2001.

- [Barlow 89] Barlow, Roger. *"Statistics: A Guide to the Use of Statistical Methods in the Physical Sciences"*. John Wiley & Sons, Chichester, 1989.
- [Blackbody 85] *"Instruction Manual Blackbody Radiation Source Model W5153 and Temperature Controller Model 215B"*. Electro Optical Industries Inc. Santa Barbara, California (USA) April 1985.
- [Breckinridge 96] Breckinridge, J.B. *"Evolution of Imaging Spectrometry: Past, Present, and Future"*. Proceedings of Imaging Spectrometry II, Descour, Michael R. and Mooney, Jonathabn M. eds., Proc. SPIE **vol.** 2819, **pp.** 2-6, 1996.
- [Britannica 94] Encyclopaedia Britannica, 1994.
- [Briz 01] Briz Pacheco, Susana. *"Teledetección Infrarroja de Gases Atmosféricos Mediante Espectrorradiometría FTIR"*. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, octubre 2001.
- [Burnay 88] Burnay, S.G.; Williams, T.L. and Jones, C.H. *"Applications of Thermal Imaging"*. 1st ed., Adam Hilger, Bristol (England) 1988.
- [Campbell 96] Campbell, James B. *"Introduction to Remote Sensing"*. 1st ed., The Guilford Press, New York (USA) 1996.
- [Casanova 00] Casanova, J.L. *"Aplicación de la Teledetección para Evaluación de los Factores Ambientales"* en *La Defensa contra Incendios Forestales*, Vélez, Ricardo coordinador, McGraw-Hill, Madrid, 2000.
- [Chuvieco 96] Chuvieco, Emilio. *"Fundamentos de Teledetección Espacial"*. Ediciones RIALP, 3^a ed., Madrid (España) 1996.
- [Chuvieco 94] Chuvieco, E. and Martín, M.P. *"Global Fire Mapping and Fire Danger Estimation Using AVHRR Images"*. Photogrammetric Eng. & Remote Sensing, **vol.** 60, (5), **pp.** 563-570, 1994.
- [Clark 84] Clark, R.N. and Roush, T.L. *"Reflectance Spectroscopy: Quantitative Analysis Techniques for Remote Sensing Applications"*. Journal of Geophysical Research, **vol.** 89, **pp.** 6329 – 6340, 1984.
- [Colimador 87] *"Instruction Manual Off-Axis Reflecting Parabolic Mirror System Model 66365"*. Electro Optical Industries Inc. Santa Barbara, California (USA) April 1987.

- [Dauguet 64] Dauguet, A. “*La Detection des Radiations Infrarouges et ses Applications*”. Dunod, Paris (France) 1964.
- [de Castro 00] de Castro, A.J.; Aranda, J.M.; Briz, S. and López, F. “*Ground-based Infrared Characterization of Fires in the 3 – 5 μm window*”. Proc. of the 19th EARSeL Symposium on Remote Sensing in the 21th Century: Economic and Environmental Applications. J.L Casanova Editor, **pp.** 337 – 341, Róterdam (Holanda), 2000.
- [de Castro 98] de Castro, A.J.; Aranda, J.M.; Briz, S.; López, F.; Hernando, C.; Guijarro, M. and Díaz, C. “*Ground-based Infrared Remote Sensing of Forest Fires*”. Europto Series. Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems and Hydrology. Barcelona Proc. SPIE **vol.** 3499, **pp.** 416 – 426, 1998.
- [den Breejen 98] den Breejen, E.; Roos, M.; Schulte, S.; de Vries, J.S. and Winkel, H. “*Infrared Measurements of Energy Release and Flame Temperatures of Forest Fires*”. III International Conference on Forest Fire Research, **vol.** I, **pp.** 517-532, Luso, Portugal, November 1998.
- [Dereniak 96] Dereniak, E.L. and Boreman, G.D. “*Infrared Detector and Systems*”. 1st ed., John Wiley and Sons, New York (USA) 1996.
- [Desk Station 96] “*Desk Station V Plus User’s Manual*”, Toshiba Corporation 1st ed., Toshiba Europe GmbH, Regensburg Germany, May 1996.
- [Dozier 81] Dozier, Jeff . “A Method for Satellite Identification of Surface Temperature Fields of Subpixel Resolution”. Remote Sensing of Environment **vol.** 11, **pp.** 221-229, 1981.
- [DT3152 98] “*Mach Series*” and “*DT 3152 User Manual*”. Data Translation Inc. 1st ed., September 1998.
- [Eckberth 88] Eckbreth, A.C. “*Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species*”, Abacus Press, Tunbridge Wells, Kent, U.K., 1988.
- [ENVI 00] “*ENVI User Manual version 3.4*”. Research Systems Inc. ed., Boulder, Colorado (USA) September 2000.
- [Fanning 98] Fanning, David W. “*IDL Programming Techniques*”, 3rd ed. Fanning Software Consulting, Fort Collins, Colorado (USA) 1998.

- [Fernández 97] Fernández, A.; Illera, P. and Casanova, J.L. (1997). “*Automatic Mapping of Surfaces Affected by Forest Fires in Spain Using AVHRR NDVI Composite Image Data*”. Remote Sensing of Environment, **vol.** 60, **pp.** 153-162, 1997.
- [Findlay 89] Findlay, Geoffrey A. and Cutten, Dean R. “*Comparison of performance of 3 – 5 and 8 –12 μm infrared systems*”. Applied Optics **vol.** 28, **No.** 23, **pp.** 5029 – 5037, December 1989.
- [Flannigan 86] Flannigan, M.D. and Vonder Haar, T. H. “*Forest Fire Monitoring Using NOAA satellite AVHRR*”, Canadian Journal Forest Research **vol.** 16 **pp.** 975 – 982, 1986.
- [Fraedrich 91] Fraedrich, Douglas S., “*Methods in Calibration and Error Analysis for Infrared Imaging Radiometers*”. Optical Engineering, **vol.** 30, **Nº** 11, **pp.** 1764-1770, November 1991.
- [Gaussorgues 89] Gaussorgues, Gilbert. “*La Thermographie Infrarouge. Principes Technologies Applications*”. Techniques et Documentation Lavoisier, 3^e éd., Paris (France) 1989.
- [Hamrelius 91] Hamrelius, Torbjörn. “*Accurate temperature measurement in thermography. An overview of relevant features, parameters and definitions*”. Proc. SPIE **vol.** 1467 Thermosense XIII **pp.** 448 – 457, 1991
- [Hecht 77] Hecht, E. y Zajac, A. “*Óptica*”. Fondo Educativo Interamericano, 1977.
- [Hernando 00] Hernando, Carmen. “*Combustibles Forestales: Inflamabilidad*” en *La Defensa contra Incendios Forestales*, Vélez, Ricardo coordinador, McGraw-Hill, Madrid, 2000.
- [Hinnrichs 00] Hinnrichs, Michele “*Hyperspectral imaging for target enhanced contrast. Final Report*”. Prepared by Pacific Advanced Technology. March 2000. [website 9].
- [Hinnrichs 97] Hinnrichs, Michele and Massie, Mark A. “*New Approach to Imaging Spectroscopy Using Diffractive Optics*”. Proceedings of Imaging Spectrometry III, Descour, Michael R. and Shen, Sylvia S. eds., Proc. SPIE **vol.** 3118, **pp.** 194-205, 1997.

- [Holst 00] Holst, Gerald C. “*Common Sense Approach to Thermal Imaging*”. JCD Publishing and SPIE Optical Engineering Press, 1st ed., Florida and Washington (USA) 2000.
- [Holst 95] Holst, Gerald C. “*Electro-Optical Imaging System Performance*”. 1st ed., JCD Publishing and SPIE Optical Engineering Press, Florida and Washington (USA) 1995.
- [Holst 98] Holst, Gerald C. “*Testing and evaluation of infrared imaging systems*” 2nd ed., Winter Park. JCD Publishing and SPIE-The International Society for Optical Engineering, Bellingham, Washington, (USA) 1998.
- [Hudson 69] Hudson, Richard D. Jr. “*Infrared System Engineering*”. 1st ed., John Wiley and Sons, New York (USA) 1969.
- [HyPAT II 01] “*HyPAT II. User’s Manual*” Pacific Advanced Technology Inc. ed. versión 4.03, 2001.
- [IDL 99] “*Using IDL*”. IDL version 5.3. Research Systems Inc. ed., Boulder, Colorado (USA) September 1999.
- [IM-PCI 95] “*IM-PCI Hardware Reference Manual*” Imaging Technology Incorporated. 1995.
- [IMSS 97] “*Image Multi-Spectral Sensor. User’s Manual. European Version*” Pacific Advanced Technology Inc. ed., versión 1.0, September 1997.
- [Kaplan 99] Kaplan, Herbert. “*Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment*”. 2nd ed., SPIE Optical Engineering Press, Washington (USA) 1999.
- [Kruse 95] Kruse, F.A.; Lefkoff, A.B. and Dietz, J.B. “*Expert System-Based Mineral Mapping in Northern Death Valley, California/Nevada Using the Airborne Visible-Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS)*”. Remote Sensing of Environment, **vol. 44**, **pp.** 309 – 336, 1995.
- [Kruse P.W. 97] Kruse, P.W. “*Principles of Uncooled Infrared Focal Plane Arrays*” in *Uncooled Infrared Imaging Arrays and Systems*, Kruse, Paul W. and Skatrud, David D. eds., of Semiconductors and Semimetals Volume 47, Willardson, R.K. and Weber, E.R. eds., Academic Press, San Diego, California, (USA) 1997.

- [Lewis 87] Lewis, B. and Von Elbe, G. “*Combustion, flames and explosions of gases*”, 3th ed., Academic Press, Orlando, 1987.
- [Lillesand 94] Lillesand, Thomas M. and Kiefer, Ralph W. “*Remote Sensing and Image Interpretation*”. 3rd ed., John Wiley and Sons, New York (USA) 1994.
- [Lloyd 82] Lloyd, J.M. “*Thermal Imaging Systems*”. Plenum Press, 3th ed. New York (USA) 1982.
- [López 92] López, F.; de Frutos, J.; González, A.M. and Navarro, A. “*Integrated Optical Filters for Infrared Electro-Optical Gas Sensor*”. Sensors and Actuators B, **vol. 6**, **pp.** 170 – 175, 1992.
- [López 94] López, F.; de Castro, A.J.; Meléndez, J. and Meneses, J. “*Design of a New Sensor of Multiple Gases Based on the Integration of Interferences Filters*”. Proc. SPIE **vol.** 2253, **pp.** 872 –, 1994
- [López S. 91] López, S.; González-Alonso, F.; Llop, R. and Cuevas, J.M. “*An Evaluation of the Utility of NOAA-AVHRR Images for Monitoring Forest Fire Risk in Spain*”. International Journal of Remote Sensing, **vol.** 12, **pp.** 1841-1851, 1991.
- [Maldague 94] Maldague, Xavier P.V. “*Infrared Methodology and Technology*” of “*Nondestructive Testing Monographs and Tracts*” Volume 7 Editor-in-Chief McGonagale, Warren J. Gordon and Breach Science Publishers, Switzerland 1994.
- [Marshall 96] Marshall, Charles; Butler, Neal; Blackwell, Richard; Murphy, Robert and Breen Tom. “*Uncooled Infrared Sensor With Digital Focal Plane Array*”. Proc. SPIE **vol.** 2746, **pp.** 23 – 31, 1996.
- [Mather 01] Mather, Paul M. “*Computer Processing of Remotely-Sensed Images. An Introduction*”. John Wiley and Sons, 2nd ed. Chichester (England) 1989.
- [Martínez 00] Martínez, E. “*Sistemas. Equipos. Organización*” en *La Defensa contra Incendios Forestales*, Vélez, Ricardo coordinador, McGraw-Hill, Madrid, 2000.
- [Meléndez 95] Meléndez, J.; de Castro, A.J.; López, F. and Meneses, J. “*Spectrally Selective Gas Cell for Electro-Optical Infrared Compact Gas Sensor*”. Sensors and Actuators A, **vol.** 46 – 47, **pp.** 417 – 421, 1995.

- [Meneses 99] Meneses Alonso, Jesús. “*Optimización de los Procesos de Selección Espectral en el Infrarrojo y su Aplicación a los Sensores de Gases*”. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, septiembre 1999.
- [Meyer 96] Meyer, Bill; Cannata, Robert; Stout, Arthur; Gin, Andy; Taylor, Peter; Woodbury, Eric; Deffner, John and Ennerson, Fred. “*Amber’s Uncooled Microbolometer LWIR Camera*”. Proc. SPIE **vol.** 2746, **pp.** 13 – 22, 1996.
- [Nicodemus 63] Nicodemus, Fred E. “*Radiance*”. American Journal Physics 31, 5, **p** 368 – 377 (1963).
- [Ontar 96] Ontar Corporation. “*PcModWin3 Manual*”, Ontar Corporation, North Andover, Massachusetts, January, 1996.
- [Papini 94] Papini, Françoise et Gallet, Paulin. “*Thermographie Infrarouge. Image et mesure*”. Masson, Paris (France) 1994.
- [Pinilla 95] Pinilla Ruiz, Carlos “*Elementos de Teledetección*”. Ra-Ma, Madrid, 1995.
- [Press 89] Press, William H. et al. “*Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*”. Cambridge University Press , Cambridge, 1989.
- [Provost 97] Provost, Foster; Fawcett, Tom. “*Analysis and Visualization of Classifier Performance: Comparison under Imprecise Class and Cost Distributions*”. Proceedings of the Third International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Huntington Beach, California, 1997.
- [Radford 96a] Radford, W.; Murphy, D.; Ray, M.; Prospt, S.; Kennedy, A and Soch, K. “*320 x 240 Microbolometer Focal Plane Array for Uncooled Applications*”. Proc. SPIE **vol.** 2685, **pp.** 80 – 90, 1996.
- [Radford 96b] Radford, W.; Murphy, D.; Ray, M.; Prospt, S.; Kennedy, A.; Kojiro, J.; Woolaway, J. and Soch, K. “*320 x 240 Silicon Microbolometer Uncooled IRFPAs with on-chip Offset Correction*”. Proc. SPIE **vol.** 2746, **pp.** 82 – 92, 1996.
- [Radiance 1 93] “*Radiance 1 Camera Manual, Release 1.0a*”. Amber Engineering Inc. A Raytheon Company ed., August 1993.
- [Radiance PM] “*Radiance PM Operating Manual*” Amber Engineering Inc. A Raytheon Company ed.,

- [Richards 99] Richards, J.A.; Jia, Xiuping. “*Remote Sensing Digital Image Analysis*”. 3rd ed. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1999.
- [Riedl 95] Riedl, Max J. “*Optical Design Fundamentals for Infrared Systems*”. SPIE Optical Engineering Press, 1st ed, Bellingham, Washington (USA) 1995.
- [Road Runner 96] “*Road Runner Technical Documentation*” and “*Road Runner Software Reference*”. BitFlow Inc. 1996.
- [Robinson 91] Robinson, J.M. “*Fire from space: Global fore evaluation using infrared remote sensing*”, Int. J. Remote Sensing, **vol.** 12, no.1, **pp.** 3-24, 1991.
- [Roderick 95] Roderick K., Stanley, technical editor, Moore, Patrick O., McIntire, Paul, editors. “*Nondestructive Testing Handbook*”, Volume 9 Special Nondestructive Methods, 2nd edition, American Society for Nondestructive Testing, USA 1995.
- [Ryu 90] Ryu, Zee M. and Pearce, John A. “*Thermographic calibration of graybody objects*”. Proc. SPIE **vol.** 1313 Thermosense XII, **pp.** 282 – 289, 1990.
- [Sabins 96] Sabins, Floyd F., “*Remote Sensing: Principles and Interpretation*”. W. H. Freeman, 3rd ed., New York (USA) 1996.
- [Schimert 00] Schimert, T.; Brady, J.; Ropson,S.; Gooch, R.; Ritchey, B.; McCardel, P.; Syllaois, A.J.; Tregilgas, J.; Rachels, K.; Weinstein, M. and Wynn, J. “*Low Power Uncooled 120x160 a-Si-based Micro Infrared Camera for Unattended Ground Sensor Applications*”. Proc. SPIE **vol.** 4040 **pp.** 23 – 30, 2000.
- [Schott 97] Schott, John R. “*Remote Sensing The Imaging Chain Approach*”. Oxford Univeersity Press, 1st ed, New York (USA) 1997.
- [Schowengerdt 83] Schowengerdt, Robert A. “*Techniques for Images Processing and Clasifcation in Remote Sensing*”. Academic Press, Orlando (USA) 1983.
- [Schowengerdt 97] Schowengerdt, Robert A. “*Reomote Sensing. Models and Method for Images Processing*”. Academic Press, San Diego (USA) 1997.

- [Sentinel 96] “*Sentinel. Personal Night Vision System. Operators’ Manual*”. Amber Engineering, Inc, A Raytheon Company ed., September 1996.
- [Simonett 83] Simonett, David S., “*The development and principles of remote sensing*” in *Manual of Remote Sensing*, Colwell, Robert N. ed., *American Society of Photogrammetry* 2nd ed., Falls Church, VA, 1983.
- [Slater 80] Slater, Philip N. “*Remote Sensing. Optics and Optical Systems*”. Addison Wesley Publishing Company, 1980.
- [Smith 93] Smith, F.G. ed. “*Atmospheric Propagation of Radiation*” Volume 2 of *The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook*, Acetta, J.S. and Shumaker, D.L. eds, copublished by Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan and SPIE Press, Bellingham, Washington, (USA) 1993.
- [Solomon 91] Solomon, P.R. and Best, P.E. “*Fourier Transform Infrared Emission /Transmission Spectroscopy in Flames*”, in *Combustion Measurements*, N.A. Chigier, ed., Hemisphere Publishing Corporation (1991).
- [SONY 00] “*Digital Video Camera Recorder DCR TRV20E. Operating Instructions*”. SONY Corporation 2000, Japan.
- [Sterans 86] Stearns, J.R.; Zahniser, M.S.; Kolb, C.E, and Sandford, B.P. “*Airborne Infrared Observations and analyses of a large forest fire*”. *Applied Optics* **vol.** 25, **pp.** 2554 – 2562, 1986.
- [Tecra 510 96] “*Manual del Usuario de Tecra serie 510*”, Toshiba Corporation 1^a edición, Toshiba Europe GmbH, Regensburg Germany, noviembre 1996.
- [Thomas 93] Thomas, P.J.; Hollinger, A.B. and Wiens, R.H. “*Adaptive Infrared Forest Fire Sensor*”. *Proc. SPIE* **vol.** 1969, **pp.** 370 – 381, 1993.
- [Thomas 96] Thomas, P.J.; Gilad, R. and Hug, E. “*Co-registration of Multispectral Imagery for Spaceborne Detection of Forest Fires*”. *Proc. SPIE* **vol.** 2744, **pp.** 644 – 652, 1996.
- [Thomas M.E. 93] Thomas, M.E. and Duncan, L.D. “*Atmospheric Transmission*” in *Atmospheric Propagation of Radiation*, Smith, F.G. ed., Volume

- 2 of *The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook*, Acetta, J.S. and Shumaker, D.L. eds., copublished by Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan and SPIE Press, Bellingham, Washington, (USA) 1993.
- [Ugarte 00] Ugarte, M.F.; de Castro A.J.; Briz, S.; Aranda, J.M. and López, F. “Automatic and Autonomus Infrared System for Remote Sensing of Forest Fires”. *Review of Scientific Instruments*, **vol. 71**, **pp.** 3657 – 3661, 2000.
- [Ugarte 01] Ugarte Suárez, Marta F. “El Método de las Diferencias Correlacionadas. Una Propuesta para la Optimización de los Procesos de Detección Infrarroja: Aplicación a los Incendios Forestales”. Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, mayo 2001.
- [Vélez 00a] Vélez, Ricardo. “Los Incendios Forestales en la Cuenca Mediterránea” en *La Defensa contra Incendios Forestales*, Vélez, Ricardo coordinador, McGraw-Hill, Madrid, 2000.
- [Vélez 00b] Vélez, Ricardo. “Combustibles Forestales: Combustibilidad” en *La Defensa contra Incendios Forestales*, Vélez, Ricardo coordinador, McGraw-Hill, Madrid, 2000.
- [Verstraete 96] Verstraete, Michael M. and Pinty, Bernard “Designing Optimal Spectral Indexes for Remote Sensing Applications”. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* , **34**, pp1254-1265 (1996).
- [Video Savant 99] “Video Savant User’s Manual (Preliminary)”. IO Industries Inc. 1999.
- [Vincent 90] Vincent, John David. “Fundamentals of Infrared Detector Operation and Testing”. John Wiley and Sons, New York (USA) 1990.
- [website 1] <http://www.insa.es/fuego/fuego.htm>
- [website 2] <http://spacesensors.dlr.de/SE/bird/>
- [website 3] http://www.ohb-system.de/eo/focus/0_focus.htm
- [website 4] <http://www.raytheoninfrared.com/html/prodmenu.htm>
- [website 5] <http://www.indigosystems.com>
- [website 6] <http://makalu.jpl.nasa.gov/aviris.html>

- [website 7] <http://eo1.gsfc.nasa.gov/Spacecraft/eo1Spacecraft.html>
- [website 8] <http://eo1.gsfc.nasa.gov/Technology/Hyperion.html>
- [website 9] <http://www.patinc.com>
- [website 10] <http://www.amber-infrared.com/products/radiance1t.html>¹
- [website 11] <http://www.bitflow.com>
- [website 12] <http://www.ioindustries.com>
- [website 13] <http://fits.gsfc.nasa.gov>
- [website 14] <http://www.manfrotto.com>
- [website 15] <http://www.liesegang.de>
- [website 16] <http://www.helicopter.virtualave.net/205.html>
- [website 17] <http://www.helicopter.virtualave.net/206.html>
- [website 18] <http://www.hutchinson.fr/paulstra.vibrachoc>
- [website 19] <http://www.rsinc.com>
- [website 20] <http://www.atsr.rl.ac.uk/atsr/index.shtml>
<http://odisseo.esrin.esa.it/ionia/FIRE/AF/ATSR/>
- [Wilmot 93] Wilmot, Donald; Owens, William and Shelton, Robert. “*Warning Systems*”, in “The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook”, Accetta, Joseph S.; Shumaker, David L., ed., of volume 7: “*Countermeasure Systems*”; Pollock, David H., ed., Infrared Information Analysis Center ; Bellingham, SPIE Optical Engineering Press, Ann Arbor, USA, 1993.
- [WiT 97] “*Operator Reference Manual*” and “*Users Manual*” Logical Vision Ltd. 1997
- [Wolfe 96] Wolfe, William L. “*Introduction to Infrared System Design*”. SPIE Optical Engineering Press, 1st ed, Bellingham, Washington (USA) 1996.
- [Wolfe 97] Wolfe, William L. “*Introduction to Imaging Spectrometers*”. SPIE Optical Engineering Press, 1st ed, Bellingham, Washington (USA) 1997.
- [Wolfe 99] Wolfe, William L. “*Infrared Design Examples*”. SPIE Optical Engineering Press, 2nd ed, Bellingham, Washington (USA) 1999.

¹ En 1999 esta empresa fue absorbida por Raytheon, por lo que ya no existe dicho *website* donde se encontraban las especificaciones de la cámara Amber Radiance 1t. Ahora se comercializa un modelo parecido Radiance HS [website 4].

- [Wood 97] Wood, R.A. “*Monolithic Silicon Microbolometer Arrays*” in *Uncooled Infrared Imaging Arrays and Systems*, Kruse, Paul W. and Skatrud, David D. eds., of *Semiconductors and Semimetals* Volume 47, Willardson, R.K. and Weber, E.R. eds., Academic Press, San Diego, California, (USA) 1997.
- [Wyatt 91] Wyatt, Clair L. “*Electro-Optical System Design. For Information Processing*”. Mc Graw Hill, New York (USA) 1991.
- [Young 94] Young, R. “*Utilization and Application of Infrared Techniques in Forest Fire Detection and Suppression Operations*”. *Infrared Methodology and Technology. Non Destructive Testing Monograph and Tracts* **vol.** 7, X.P.V Maldague ed., Gordon and Breach Science Publishers, **pp.** 453 – 468, 1994.